

**Návrh systémů řízení CNC  
laserového gravírování**

*Design of CNC laser engraving systems*

**Ing. Martin Jurek**

**Vědecké spisy Fakulty strojní**

*Edice: Autoreferáty disertačních prací, sv. 347*

**2019**

Doktorská disertační práce byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře automatizační techniky a řízení Fakulty strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

Tato disertační práce vznikla za podpory projektu Aplikační výzkum v oblasti řízení strojů a procesů – SP2019/51 financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Obhajoba disertační práce se koná dne ..... 2019 v místnosti ..... v ..... hodin v budově  
VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba.

S disertační prací je možné se seznámit na studijním oddělení Fakulty strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, místnost A132.

© Martin Jurek 2019

ISBN 978–80–248–4294–3

**Anotace disertační práce**

JUREK, Martin.

*Návrh systémů řízení CNC laserového gravírování*, Katedra automatizační techniky a řízení, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 46 stran. Školitel: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Tato práce se zabývá řízením a optimalizací výrobního procesu laserového gravírování fotografií do dřeva. Hlavním cílem je zvýšit kvalitu přenosu digitální fotografie na povrch dřeva jeho postupným vypalováním. Indikátory kvality jsou počet rozlišitelných odstínů a jejich rovnoměrné rozložení po celé škále odstínů dle vstupní fotografie.

V rámci práce byl vytvořen návrh řídicího systému skládajícího se z několika podsystémů. Ty mají na základě testování a průzkumu současného stavu technologie, potenciál posunout výrobní proces dále v měřítku kvality. Jedná se o využití matematického modelu stroje, kalibrační systém, filtrace vstupní grafiky a zpracování simulace výsledného výrobku k optimalizaci výrobních parametrů. Tato práce se zabývá popisem komplexního systému, který využívá zavedení simulační zpětné vazby do přípravního i výrobního procesu.

Navržený systém funguje následovně. Vstupní fotografie je v první fázi filtrována v prostorové a frekvenční oblasti na základě předdefinovaných parametrů. Dále dochází k vygravírování kalibračního vzorku škály odstínů na připravený kus dřeva. Ten je následně naskenován a z jeho pravých barev je sestaven a dopočítán předpokládaný výsledek výroby (simulace). Histogram a ostrost simulovaného obrázku jsou zpětně využity na přestavení parametrů prostorové a frekvenční filtrace a CAM skriptu. V CAM skriptu dochází ke kalibraci výkonové charakteristiky zářiče a profilu paprsku (zaostření). Následně je vstupní fotografie převedena do výrobního kódu a poslána do výroby.

Během práce vzniklo celkem 6 verzí laboratorního modelu, které byly využívány a postupně zdokonalovány pro testování jednotlivých fází. Sedmá verze laboratorního modelu je ve stavu finálního návrhu a následně se bude realizovat. Jedná se o první verzi, která bude schopna realizovat všechny navržené podsystémy.

**Klíčová slova:** Laser, gravírování, dřevo, CNC, automatické řízení, kvalita, optimalizace, frekvenční filtrování, fotografie, vypalování, stupně šedi, karbonizace.

**Annotation of Dissertation Thesis**

JUREK, Martin.

*Design of CNC laser engraving systems*, Department of Control Systems and Instrumentation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-TU Ostrava, 46 pages. Tutor: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

---

This thesis deals with control and optimization of laser engraving of photographs into wood. The main goal is to improve the quality of digital photography transmission to the wood surface by burning. Quality indicators are the number of distinctive shades and their uniform distribution across a range of shades according to the input photo.

A design of a control system consisting of several subsystems was created as part of the work. These subsystems are based on background research and have the potential to improve the production process in term of quality. They are the mathematical model, calibration system, filtration of input graphics and processing of the product simulation to optimize production parameters. This thesis deals with the description of a complex system that uses the introduction of simulation feedback into the preparatory and production processes.

The designed system works as follows. The input photo is filtered in the spatial and frequency areas based on the parameters that have been predefined. The calibration sample with the range of shades is engraved on the piece of wood. This is then scanned and the expected result of the production (simulation) is compiled and calculated from its true colors. The histogram and sharpness of the simulated image are used retrospectively for spatial and frequency filtration settings and CAM script parameters. The CAM script calibrates the performance characteristics of the radiator and beam profile (focus). The production code of input photo is then generated and sent to the production

During the work, a total of 6 versions of the laboratory model were created, which were used for testing of individual phases. The seventh version of the laboratory model is in the state of the final design and will be implemented in upcoming months. This is the first version, which will be able to implement all the designed subsystems.

**Keywords:** Laser, engraving, wood, CNC, automatic control, quality, optimization, frequency filtering, photography, burning, grayscale, carbonization.

## Obsah

SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÉHO ZNAČENÍ .....	5
1 ÚVOD .....	6
2 SOUČASNÝ STAV LASEROVÉHO GRAVÍROVÁNÍ FOTOGRAFIÍ .....	7
2.1 Laserové gravírování .....	9
2.2 Úpravy vstupní grafiky .....	11
2.3 Identifikace gravírovaného podkladu .....	13
2.4 Řízení gravírovacího procesu .....	14
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	15
4 NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ GRAVÍROVACÍHO PROCESU .....	16
4.1 Motivace návrhu .....	16
4.2 Schéma navrženého systému řízení .....	17
5 MODEL GRAVÍROVACÍHO STROJE .....	20
5.1 Laboratorní model .....	20
5.2 Matematický model CNC stroje .....	22
6 SYSTÉM ŘÍZENÍ PRO TLUMENÍ VIBRACÍ .....	28
7 FILTRACE GRAFICKÝCH PODKLADŮ .....	30
8 AUTOMATICKÁ KALIBRACE .....	32
9 SIMULACE GRAVÍROVANÉ FOTOGRAFIE .....	34
10 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU .....	35
11 ZÁVĚR .....	36
11.1 Přínos pro vědní obor .....	37
11.2 Přínos pro praxi .....	38
11.3 Doporučení na další výzkum .....	38
12 CONCLUSIONS .....	39
12.1 Contribution for scientific discipline .....	40
12.2 Contribution for practice .....	41
12.3 Recommendation for further research .....	41
POUŽITÁ LITERATURA .....	43

## SEZNAM ZKRATEK A POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Značka	Význam	Jednotka
kB	Kilo-Byte	
CAM	Computer aided manufacturing (Počítačová podpora obrábění)	
CNC	Computer numeric control (počítačové číslicové řízení)	
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	
CW	Continuous wave	
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)	
ND	Neodyme	
PM	Permanent magnet	
px	Pixel	
RGB	Red-Green-Blue (barevný model; červená – zelená – modrá)	
VR	Variable reluctance	
YAG	Yttrium Aluminium Garnet	
$A$	Amplituda Z-V Shaperu	(-)
$b$	Koeficient tlumení	(N s m <sup>-1</sup> )
$D$	Koeficient viskózního tření	(N m s rad <sup>-1</sup> )
$F$	Síla	(N)
$F(u,v)$	Matice obrazu grafického podkladu ve frekvenční oblasti	(-)
$f(x,y)$	Matice grafického podkladu v prostoru	(-)
$g$	Tloušťka mezery mezi rotorem a statorem	(m)
$G_{mx}(s)$	Přenos motoru osy x	(-)
$G_{my}(s)$	Přenos motoru osy y	(-)
$G_{rx}(s)$	Přenos řemene osy x	(-)
$G_{ry}(s)$	Přenos řemene osy y	(-)
$H_g$	Intenzita magnetického pole	(A m <sup>-1</sup> )
$I$	Proud	(A)
$J$	Moment setrvačnosti	(kg m <sup>2</sup> )
$k$	Koeficient tuhosti	(N·m <sup>-1</sup> )
$K$	Koeficient Z-V Shaperu	(-)
$k_1$	Zesílení přenosu	(-)
$M$	Index sloupce matice graf. podkladu (osa x)	(-)
$n$	Počet závitů cívky	(-)
$N$	Index řádku matice graf. podkladu (osa y)	(-)
$p$	Počet pólů/zubů rotoru (pro hybridní motory)	(-)
$s$	Komplexní proměnná	(-)
$t$	Čas (spojitý)	(s)
$T$	Perioda	(s)
$T_0$	Časová konstanta přenosu	(-)
$w$	Tloušťka zubu	(m)
$x$	Podélná délka zubu	(m)
$\theta$	Úhel rotace	(rad)
$\vartheta$	Logaritmické tlumení	(-)
$\lambda$	Rozteč zubu	(rad)
$\mu_0$	Permeabilita v mezeře mezi statorem a rotorem	(H m <sup>-1</sup> )
$\zeta$	Koeficient poměrného tlumení	(-)
$\Phi$	Magnetický tok	(T m <sup>2</sup> )
$\varphi$	Fáze komplexního čísla	(rad)
$\omega_n$	Vlastní frekvence	(s <sup>-1</sup> )

## 1 ÚVOD

Přenos informací na povrch materiálu se stal nedílnou součástí naší společnosti. Tato schopnost se začala rozvíjet již v pravěku a vývojem společnosti obsadila nenahraditelnou roli. I v dnešní digitální době se jedná o jeden z nejpoužívanějších způsobů přenosu informací mezi lidmi. Mimo oblast věcné komunikace nachází své uplatnění i v umění a abstrakci. Zachycení dané informace co nejvěrohodněji a nejpresněji je snahou každého přenosu. Existuje řada technologií, druhů informací a materiálů, které lze využít. Tato práce je věnována problematice laserového gravírování fotografií a grafik na dřevěný podklad.

Výše zmíněná kombinace má několik úskalí, které jsou v rámci práce studovány, popsány a řešeny. Technologie laserového gravírování spočívá v řízeném generování zaostřeného světelného paprsku, jehož energie zahřívá místo dopadu na netransparentní materiál. V závislosti na druhu materiálu a velikosti dodané energie dochází ke změnám materiálu. Tyto změny jsou z pravidla neměnné. Schopnost dopředu předpovědět intenzitu této změny je jednou z klíčových oblastí laserového gravírování. Pro oblast gravírovaných fotografií na dřevěný podklad je nejpodstatnější změna odstínu daného materiálu. Práce se zabývá vlivem výrobních podmínek na výsledný odstín gravírovaného materiálu.

Další oblast problematiky, která vstupuje do laserového gravírování, je vstupní obrázek. Dnešní fotografie jsou foceny na sofistikovaných aparátech, které poskytují tisíce různých odstínů. Ty jsou vhodné na digitální zobrazení či technologii tisku. Laserové gravírování však v současné době není schopno přenést takový počet odstínů. Práce se proto zabývá vhodnou filtrací vstupní grafiky, která optimalizuje odstíny digitální fotografie pro aplikaci laserového gravírování.

Hlavním prvkem práce je automatizovaný řídicí systém, optimalizovaný pro laserové gravírování fotografií do dřeva. Systém je schopen vygravírovat vzorek odstínů na potřebný kus dřeva. Naskenovat výsledné odstíny a na jejich základě upravit odstíny fotografie a intenzitu laserového paprsku, aby počet přenesených odstínů byl co největší. Zároveň je schopen řídit profil laserového paprsku. Díky tomu zajišťuje dodatečné rozšíření možných odstínů gravírovaného dřeva.

## 2 SOUČASNÝ STAV LASEROVÉHO GRAVÍROVÁNÍ FOTOGRAFIÍ

Tato práce se zaměřuje na oblast využívající technologii laserového paprsku a CNC řízení. Laserové technologie jsou ve společnosti známy už několik desetiletí (1). Jedním z prvních laserů, který byl sestaven a zprovozněn byl pevnolátkový laser z krystalu syntetického rubínu. Ten byl odzkoušen již v roce 1960 v Malibu, CA Theodorem H. Maimanem (2). Další objev, který později ovlivnil velkou část výrobního průmyslu, byl sestavení CO<sub>2</sub> laseru C. K. N. Patelem v roce 1963 (3). Vynálezy laserů byly až do začátku 80. let skryty v laboratořích. Teprve až počátkem 90. let se svět dozvěděl o nové technologii laserového paprsku. Bylo to díky rozmachu systému kompaktních disků (CD). Poté následovalo mohutné nasazení nízko a vysoko výkonových laserů do výrobního průmyslu. Laserové systémy se začaly využívat pro řezání, svařování, vrtání, popisování, povrchové úpravy, měření a další (4). Díky postupnému poklesu tržních cen méně výkonných gravírovacích laserů (do 200 W), existuje v současné době i velké množství malých subjektů, které vlastní laserovou technologii. Od těžké a sériové výroby se tak lasery začaly dostávat přes menší výroby i do prototypových, designových a dalších dílen. Mezi lety 1991 a 1999 klesla cena polovodičových laserů z 2000\$/W na 100\$/W (4). Výhodami tohoto zářiče jsou také velmi kompaktní rozměry, účinnost a možnosti řízení. Díky tomu jsou polovodičové lasery nejběžnějším typem používaného zářiče (5). Další výhodou je možnost optimalizovat výstupní charakteristiku laseru. Jedná se především o parametry výkonu, frekvenci modulace a vlnové délky. V posledním desetiletí došlo k významnému pokroku ve vývoji polovodičových laserů. Posun technologie byl dosažen v mnoha oblastech, mezi ty nejdůležitější patří například výstupní výkon, větší rozsah výstupních vlnových délek a spolehlivost (6).

Nízko výkonové laserové CNC stroje na trhu jsou často dodávány s poměrně jednoduchými softwary a řídicími algoritmy, které mnohdy neumí využít plný potenciál zářiče. Většina dnešních strojů nemá zpětnou vazbu na kvalitu gravírovaného výsledku. Zpětnou vazbou je zde samotný operátor, který zadává výrobní parametry do stroje manuálně na základě předchozí znalosti a aktuálního výsledku. Komplikovanost u laserového gravírování fotografií do dřeva vytváří nehomogenita gravírovaného materiálu a různorodost grafického podkladu. U sériové výroby jednoduchého grafického návrhu se tento systém řízení kvality osvědčuje. Náklady na postupné odladění a testování jsou totiž u velké série minimální. U zakázkové výroby fotografií či prototypů je to obráceně. U fotografií se navíc jedná o značně komplikované vstupní podklady, které obsahují milióny pixelů a tisíce odstínů. Kvalita přenosu takových podkladů má bez přesné zpětné vazby velmi proměnné výsledky. I zkušený operátor potřebuje několik testů k odladění histogramu dané fotografie či výkonové charakteristiky laseru pro konkrétní povrch. Každá vstupní fotografie je jiná a často se zásadně liší. Nejzásadnější rozdíly jsou ve velikosti detailů, ostrosti přechodů a celkový tvar histogramu.

Laserové gravírování fotografií je obecně velmi příhodná oblast pro optimalizační a řídicí algoritmy. Existuje množství výzkumů (7), (8), (9), (10), které se zabývají



popisem změny povrchu po dopadu laserového paprsku. Stále je však náročné odhadnout dopředu výsledek pro každou jednu výkonovou úroveň laseru, různé podklady a profily paprsku. Tato práce se bude zabývat aplikací kalibračního systému, který využívá nasazení optické zpětné vazby. Ta bude mít za úkol do připraveného materiálu vypálit vzorkovník výkonových úrovní a vyhodnotit jejich odstíny. Ty totiž závisí na velkém množství proměnných parametrů. Odstín povrchu dřeva závisí na druhu a části stromu, vlhkosti, stáří a povrchové úpravě. Dalšími parametry, které ovlivňují výsledek vypálení jsou jeho pracovní podmínky.

Prvním prvkem, který zásadně ovlivní výsledný kontrast a škálu odstínů je výběr vhodného dřeva. Pro dosažení vyššího kontrastu a maximalizování počtu odstínů je vhodné využívat materiály světlejší a tvrdší. Co se týče vnitřní struktury závisí na hustotě materiálu a jeho schopnosti nasáknout okolní vlhkost. Dále pak závisí na odrazivosti paprsku, a tudíž výslednému zbarvení dřeva.

Dalším vstupem výsledného odstínu je povrchová úprava a celkový způsob zpracování. Závisí zde například jak bylo dřevo sušeno, jelikož tím dochází ke změnám vlastností materiálu (11). Závisí také na jeho povrchové struktuře, či jemnosti povrchu, který se vytváří různými postupy broušení.

Dále závisí na stáří dřeva, popřípadě jeho umělému staření pomocí UV světla a tepla (9). To způsobuje rozpad ligninu, žloutnutí dřeva a díky tomu mění celkový kontrast výsledku (10). Zde závisí na délce procesu, jeho intenzitě a teplotě, která vzniká dopadem energie na povrch materiálu (9).

Vlhkost je jedním z nejsledovanějších parametrů dřeva i při jeho samotném zpracování (11), (12), (13). Výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti, a především geometrické vlastnosti dřeva. Díky vlhkosti lze u pórovitých materiálů jako je dřevo, ovlivnit pracovní teploty a hustotu gravírovaného materiálu. Vlhké dřevo má díky vyšší tepelné kapacitě také vyšší odolnost vůči spálení. Vypálený bod do dřeva má pak menší plochu, a tudíž je možno dosáhnout vyššího rozlišení. Dochází i ke snížení plochy tepelně ovlivněné oblasti. Pro lepší výsledek gravírování je vhodné zabránit nekontrolovanému hoření, které pak probíhá především do hloubky materiálu. Díky vlhkosti je jednodušší paprsek lokalizovat. Zároveň přítomnost vody brání hoření na povrchu materiálu, pod povrchem i nad ním v podobě vodní páry.

Důležitým aspektem laserového procesu jsou jeho výrobní podmínky. Zde je myšlen především výkon laserového paprsku a jeho profil (zaostření). Tyto kombinace výrazně ovlivňují výslednou teplotu procesu a dobu, po kterou je materiál zpracováván. Mimo zaostření ovlivňuje dobu procesu samozřejmě také rychlost posunu pracovního nástroje. Výkon laserového paprsku je řízen jeho okamžitým výkonem a pracovním módem. Laserový paprsek pracuje v CW (continous wave) nepřetržitém módu, nebo v pulsním módu. Použitý mód výrazně ovlivní celkový počet fotonů, které v čase dopadají na povrch a tím i jeho teplotu (8). Typickou úlohou pro řízení intenzity a zaostření paprsku je proces laserového gravírování uvnitř struktur transparentních materiálů. Takto dochází k tepelné změně materiálu pouze v zaostřeném bodě, kde jsou potřebné podmínky. Obdobným způsobem je možné vytvářet i různé 3D struktury vně materiálů

(14). Výsledný proces vzniká, je-li v žádaném místě dostatečně velký přísun energie v podobě fotonů. Pokud je tato intenzita dostatečně velká, materiál se zahřeje, roztaví a pokud se dostane na bod varu, tak se začne vypařovat (15).

## 2.1 Laserové gravírování

Oblast laserového gravírování patří mezi velmi rozvinuté technologie. Její využití lze najít ve všech typech průmyslu, zakázkové výrobě i umělecké tvorbě. Zkratka LASER je odvozena z „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Světlo laseru je generováno ve formě velmi úzkého svazku. Takto získané světlo je monochromatické a koherentní.

Průmyslové lasery jsou obvykle klasifikovány aktivním médiem. Existuje více typů aktivního média, mezi nejpoužívanější patří médium plynné, kapalné, polovodičové a pevnolátkové (4).

Nedlouho poté, co Heinrich Rudolf Hertz experimentálně ověřil Maxwellovy a Faradayovy teoretické předpoklady o generování elektromagnetických vln pomocí vysokonapětové indukční cívky, bylo zřejmé, že záření může být vyrobeno v různém rozsahu elektromagnetického spektra. Spektrum se dělí na několik částí v závislosti na vlnové délce. Pro aplikace průmyslové výroby jsou nejpoužívanější především infračervené, viditelné a ultrafialové části elektromagnetického spektra (4), (17).

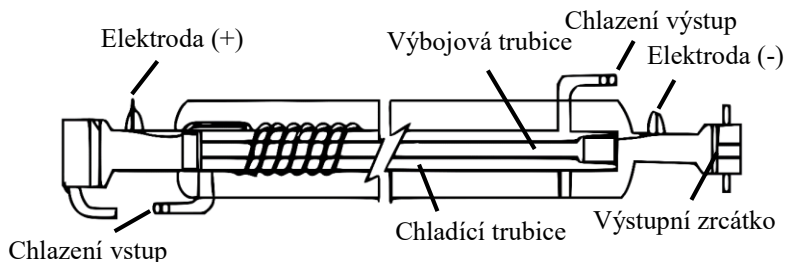
Laserové světlo je generováno přechody elektronů mezi základními a vyššími energetickými hladinami v různých médiích. K první části tohoto přechodu dochází například přísunem světla (energie) v laserech s pevným aktivním médiem, nebo kolizí elektronů v plynných laserech. Takto postupně dojde k excitaci velké části elektronů. Tyto částice se pak spontánně vrací zpátky na nižší energetickou hladinu rovnovážné polohy, kdy dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Takto vyzářené fotony pak dále v aktivním médiu interagují s ostatními elektrony na vyšší energetické hladině. Díky tomu dochází k uměle stimulované emisi fotonů, které mají stejnou frekvenci a fázi jako ty, které ji spouštějí. Díky speciální konstrukci tzv. rezonátoru dochází k odrazu fotonů mezi dvěma zrcadly. Tímto způsobem pak může vyvolaný foton několikrát projít aktivním médiem a stimulovat emisi dalších fotonů. Paprsek fotonů pak dále opouští rezonátor skrze výstupní polopropustné zrcadlo. (2). Typy laserů, které se nejčastěji využívají pro laserové gravírování, jsou popsány v následujících podkapitolách.

**CO<sub>2</sub> Plynné lasery** jsou v současné době nejvyužívanějším zářičem pro opracování dřeva. Plyny disponují vlastnostmi, které je předurčují k využití pro generování laserového paprsku. Plynné médium může být excitováno přímým elektrickým proudem, je homogenní, může být škálováno a nebrání šíření laserového paprsku. Mají však nižší hustotu aktivních částic. Toto je příčinou větších konstrukčních rozměrů plynových zářičů, ten je zobrazen na obr. 2.1. Výstupní emise plynného laseru jsou rozloženy do tří samostatných částí elektromagnetického spektra. Jedná se o složky ultrafialového, viditelného a infračerveného záření. Plynné lasery se dále dělí na

základě způsobu vzniku fotonů v aktivním médiu. Jedná se o lasery atomární, iontové a molekulové. (3)

Neutrální (atomární) plynové lasery využívají jako své aktivní médium vzácné plyny jako jsou xenon, krypton, argon, neon a jejich směsi (18).

Dalším typem jsou iontové plynové lasery. Ty vyžadují větší budící energii, než je tomu



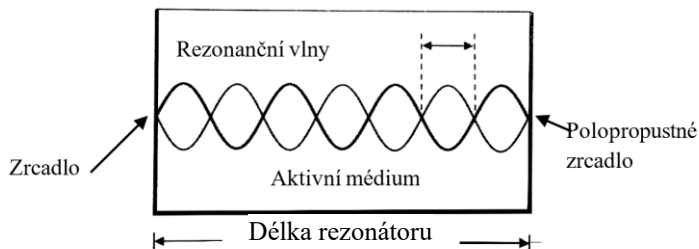
Obr. 2.1 - Schéma CO<sub>2</sub> laserového zařízení

u laserů neutrálních. V praxi se nejvíce osvědčily opět média vzácných plynů, a to především argon a krypton. (4)

Molekulární plynové lasery nejčastěji využívají molekuly oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Dvouatomové molekuly jsou pak vhodnější pro využití v impulsním módu, oproti módu kontinuálnímu (CW – continuous wave). Vyšší hustoty elektrického proudu jsou zapotřebí, avšak při větších objemech jsou dosaženy značné výstupní výkony. CO<sub>2</sub> lasery prošly dlouhým vývojem pro dosažení vysokých výkonů. Dnes dosahují zařízení s tímto médiem výkonu až několik kilowatt. (19)

**Polovodičové laserové diody** zaznamenaly dramatické zlepšení v posledním desetiletí. Byla to dlouhá cesta od prvních testů, kterých bylo dosaženo na více místech najednou již v roce 1962 (17). Mezi první aplikace historicky patřily komunikace optických vláken a ukládání dat na celou řadu datových nosičů a zařízení. Tyto aplikace a jejich neustále vzrůstající požadavky umožnily rozvoj diodových zařízení, jak je známe dnes. Tento jev je úzce spojen se škálováním výpočetní síly procesorů, kterou velmi přesně předpověděl Gordon E. Moore (18). Ten stanovil již v roce 1965 trend, který každým rokem zdvojnásobil počet tranzistorů na čipu. Díky tomu rostl výkon výpočetní techniky a s ním samozřejmě i potřeba žádaná data ukládat a sbírat. S rostoucím počtem dat roste i čas jejich přenosu, takže vzrůstaly požadavky na přenosovou rychlost mezi nosiči, jejich zápis a čtení. V těchto aplikacích nacházely uplatnění již zmíněné polovodičové diody. Jejich aktuální rozvoj však způsobil postupné nasazování i do celé řady nových aplikací. Vývoj totiž zvýšil spolehlivost, výstupní výkon a rozšířil možnosti výstupní vlnové délky. Navíc potenciál polovodičových laserů ještě zdaleka není využit naplno, což se o řadě dosavadních zařízení již nedá říci (17), (19). Tyto vlastnosti pak předurčily polovodičové lasery i do dalších aplikací, ve kterých je vidíme dnes a uvidíme i v budoucnu. Díky vyššímu výkonu je možné polovodičové lasery používat v aplikacích zpracování materiálu, v zobrazovací technice, metrologii,

medicině a komunikaci (6), (17). Využití polovodičových laserů stoupá každým rokem a jsou nejvíce využívaným typem laserového zářiče na světě. K tomu dochází právě díky výše zmíněné škále využití. Celkový světový obrat z prodeje laserových zářičů v roce 2016 byl 10,4 miliard dolarů (20). Z toho 45 % patřilo právě prodeji polovodičových laserů. (21)



Obr. 2.2 - Schéma principu rezonátoru

I polovodičové lasery využívají optického rezonátoru (obr. 2.2). Jedná se o zařízení, skládající se ze dvou krajních zrcadel. U diodových laserů jsou však tyto konstrukce velmi miniaturní. Často se jedná o kousky krystalů nebo difrakční mřížky. Výstup vyzářených fotonů prochází optickým rezonátorem, kde se odráží od krajních zrcadel a opakovaně prochází aktivním prostředím. Takto dochází ke stimulované emisi. Vlny fotonů se postupně skládají a vzniklé vlnění se ustaluje v kmitavých módech. Těch se vleze do rezonátoru konečné množství a přetrvávají pouze takové, které se přesně vlezou do dutiny rezonátoru. Násobek poloviny vlnové délky je pak roven šířce rezonátoru. Takto lze geometrii rezonátoru ovlivňovat výstup polovodičového zářiče. Na základě šířky rezonátoru existují singlemode (jedno-módové) a multimode (více-módové) laserové paprsky. Paprsky s jedním módem mají užší (přesnější) spektrální šířku výstupního záření, naopak lasery s více módy dosahují větších výkonů (2), (5), (6).

Mezi nejpoužívanější typy **pevnolátkových laserů** patří lasery s aktivním médiem ND:YAG. YAG (Yttrium Aluminium Garnet) je zkratkou pro opticky izotropní krystal yttrito-hliníový granát ( $Y_3Al_5O_{12}$ ). Jedná se o bezbarvý krystal s kubickou strukturou. Aktivní prostředí je navíc dopováno ionty neodymu ( $Nd_3^+$ ). Fyzikální principy jsou zde velmi podobné, těm, které probíhají i v plynných ( $CO_2$ ) lasech. Design zářiče, jeho konstrukce a specifikace se však liší (4). Pevnolátkové lasery se dále dělí dle typu aktivního prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi fotonů. Prvním aktivním prostředím těchto laserů byly krystaly drahých kamenů (rubín a safír). Ty jsou velmi nevhodné pro spojitě zatížení, proto se v dnešní době využívají skla s příměsí vzácných prvků. Typická vlnová délka takových zářičů je 1064,1 nm (Nd:YAG) (2), (24).

## 2.2 Úpravy vstupní grafiky

Před gravírováním fotografie je vhodné vstupní grafiku náležitě upravit. V současné době se používá několik přístupů grafických úprav.

Jedna z metod, která je obzvláště vhodná pro lasery, je rozptylování neboli dithering viz. obr. 2.2. Tato metoda má mnoho variant výsledného zpracování (23). V konečném výsledku se jedná o přepis odstínů pixelu na funkci jejich hustoty. V takovém obrázku má pak pixel pouze dvě hodnoty (0 - světlá, 255 - tmavá) a jednotlivé odstíny jsou udány různou hustotou tmavých pixelů na bílém podkladu.



Obr. 2.3 - Filtrace – vlevo originál ve stupních šedi, vpravo aplikace metody rozptýlení

Metoda rozptylování se velmi běžně používá již dlouhou dobu v tisku, všude tam, kde není třeba mít detailní a drahý obrázek (například noviny). Ačkoliv se jedná o velmi starou metodu, stále probíhá její vývoj (24), (25). Uplatnění v laserovém gravírování nachází především proto, že řada vysokovýkonných laserů (nad 100 W) nenabízí tak jemné a rychlé řízení výkonu paprsku. Hlavní výhodou této metody je její nenáročné řízení kvality. Jelikož je výsledný odstín tvořen pouze různou hustotou bodů, je kvalita výsledných fotografií velmi stabilní. Tato metoda navíc umožňuje pulzní řízení výkonu laseru a dosahuje tak při výrobě vysokých rychlostí. Navíc při pohledu z dálky se jednotlivé detaily fotografie rozplývají, takže nekvalita se ztrácí. Díky tomu je tato metoda velmi oblíbená a rozšířená (26).

## 2.3 Identifikace gravírovaného podkladu

Zásadní rozdíl mezi tiskem a vypalováním obrázků do různých materiálů je dopad samotného materiálu na výslednou kvalitu. Zatímco tisk přidává známý a jednoduše dávkovatelný materiál na povrch, laserové vypalování používá podkladový materiál k samotné reprodukci obrazu. Kvalita výrobku je cílovým materiálem ovlivněna. Pro řízení laserového gravírování je zapotřebí, počítat s vlastnostmi materiálu více než u tisku. Vstup povrchu do gravírovacího procesu je vyobrazen na obr. 2.4. Podkladový materiál ovlivňuje výslednou škálu odstínů a úroveň detailů. K tomu dochází jeho látkovým složením, což vede k přirozené barvě opracovaného i neopracovaného povrchu. Jeho struktura, teplota, vlhkost a odolnost vůči hoření pak ovlivňuje úroveň jednotlivých detailů.



Obr. 2.4 - Schéma vstupu povrchu podkladového materiálu do gravírovacího procesu

Mnoho vědeckých studií se zabývá způsoby, jak popsat povrch dřeva. Často se jedná i detekci druhu dřeva. Ty lze rozpoznat pomocí struktury a pórů (27). Existují možnosti, jak rozpoznat typ dřeva z jeho vláken (28). Většina systémů však využívá rozpoznávání barvy dřeva (29), (30), (31). K vyhodnocování se využívají i principy fuzzy logiky (32) nebo neuronových sítí (33). Základem většiny systémů je naskenování povrchu dřevěné desky a následné zpracování získaného obrazu. Vnitřní struktury dřeva je možné dále identifikovat pomocí výpočetní tomografie (34). V tom případě se pak zpracovává 3D model celého bloku dřeva. Pro oblast laserového gravírování je podstatný pouze povrch, proto se v návrhu řídicího systému počítá s využitím digitální kamery. Díky skenu celého podkladu je možno zakomponovat do zpracování výrobního kódu i strukturu a barevnou nehomogenitu dřeva (35). Dalším parametrem při skenování povrchu dřeva je jeho stáří. To ovlivňuje odstín díky působení UV záření (36).

## 2.4 Řízení gravírovacího procesu

Současné stroje na trhu disponují různými systémy a funkcemi pro zlepšení kvality výrobního procesu. Míra komplexnosti a kvality je funkcí investovaného know-how, a tudíž ceny výsledného stroje. Špičkou v řízení pracovního procesu jsou průmyslové stroje určené pro řezání kovů. Tato technologie není nijak jednoduchá, proto i systémy, které se využívají obsahují celou řadu propracovaných podsystémů, které pomáhají zvýšit výkon pracovní hlavy. Kovy jsou obzvláště náročné pro tento typ aplikací díky jejich odrazivosti paprsku, tepelné vodivosti, celkové pevnosti a struktuře (15), (22). Na odolné materiály se využívají doplňující systémy, jako jsou asistenční plyn, nebo průběžné ostření paprsku. Asistenční plynem bývá médium podporující hoření, nejčastěji pak čistý kyslík. Díky tomu materiál snáze sublimuje a je možné rychlejšího úbytku materiálu při konstantním výkonu. Opakem je využití ochranné atmosféry, která má za úkol chránit opracovávaný bod před kyslíkem. Tyto metody jsou známé i pro svařování, kde je nutné chránit svarovou lázeň před přístupem okolní atmosféry.

Řízení gravírovacího paprsku do dřeva není tak náročné na udržování vysokého výkonu nebo na přesné zaostření paprsku (v rámci setin až tisícín). Je však náročné na jemné řízení podmínek dopadu gravírovacího paprsku. Dřevo totiž velmi rychle sublimuje a jeho dostupné škály ohoření jsou pro výkonnostní složky laseru těsně blízko vedle sebe. Obecně se dá hovořit, že pro polovodičový laser okolo 6 W je zapotřebí řídit laser s přesností okolo 1-10 % výkonu zářiče. U 60 W CO<sub>2</sub> laseru už to bude okolo 0,01-1 %, zatímco lasery nad 100 W už musí paprsek řídit v tolerancích 0,001-0,01 %. I díky tomu bývají CW (continuous wave) metody laserového gravírování fotografií do dřeva velmi nepřesné u CO<sub>2</sub> laserů. Jedná se totiž o značně hůře říditelné zářiče (v porovnání s polovodiči) a navíc se od nich vyžaduje až o tři řády citlivější řízení.

Samotný řídicí systém přináší velké rozdíly mezi dnešními CNC laserovými stroji. Existuje celá řada profesionálních řídicích firmwarů, ty jsou však uzavřené a nelze je volně sdílet. Řídicí systém navržený v rámci této práce počítá s možností aplikace na volně dostupných open-source CNC systémech. Takové systémy lze libovolně upravovat a využívat řadu profesionálně přeprogramovaných funkcí. Jsou ideálním stavebním prvkem pro laboratorní modely a úzce zaměřené technologie. Využívají standardizovaný programovací jazyk G-Code (známý také jako RD-274).

G-Code je ve své soubor instrukcí a informací, jejíž provedení daným strojem vyústí ve výrobu potřebného produktu. G-Code se běžně využívá v CNC obráběcích strojích, 3D tisku, běžném tisku, měřicích strojích, tvářecích procesech a dalších technologiích (37), (38).

Existuje celá řada dostupných CNC řídicích systémů, na kterých lze postavit vlastní návrh. Po dvouletém testování byl zvolen firmware Grbl.

### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce vzniká za účelem zpřesnění a optimalizace CNC laserového gravírování. Během práce bylo sestaveno a odzkoušeno celkem 7 verzí gravírovacího plotteru. Po několikaletém studiu a testování byly vytipovány kritická místa současného stavu technologie. Ty lze kvalitativně posunout komplexním návrhem řídicího systému. Takový systém bude mít několik podsystémů, které budou provázaně řídit kvalitu celého výrobního procesu. Cíle disertační práce byly rozděleny do následujících bodů.

1. Popis současného stavu procesu laserového gravírování.
2. Sestavení matematického modelu gravírovacího stroje, implementace do simulačního prostředí MATLAB/Simulink a srovnání simulačního modelu s reálným strojem.
3. Optimalizace výrobního kódu gravírovacích laserů pomocí filtrace grafických podkladů a modifikace CAM softwaru.
4. Návrh expertního systému pro automatickou kalibraci výrobních parametrů gravírovacího procesu.
5. Simulace výrobku s predikcí kvality hotového výrobku.
6. Zhodnocení výsledků dosažené kvality výrobku a srovnání se třemi typy současného profesionálního řešení.



## 4 NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ GRAVÍROVACÍHO PROCESU

Předchozí kapitola se zabývala přehledem současného stavu různých prvků systému řízení, které mají spojitost s laserovým gravírováním fotografií na dřevěný povrch. Na dnešním trhu jsou celé řady laserových záříčů. Dohromady umožňují mechanicky opracovat prakticky všechny materiály. Jejich uplatnění se nachází také v medicíně, telekomunikaci, měření a chemii. Pro práci s dřevem se v současnosti nejvíce využívá nízko výkonových CO<sub>2</sub> laserů. Jedná se o univerzální stroje, které dokáží při své vlnové délce (10600nm (39)) a daném maximálním výkonu (40-250 W) efektivně opracovat a řezat většinu měkkých materiálů s nižší tepelnou vodivostí (plast, dřevo, kůže, papír).

Jedním ze zásadních problémů při gravírování (vypalování) grafiky na dřevěný podklad je řízení výsledného odstínu vypálení. Tuto úlohu lze jednoduše obejít metodami polotónování (halftoning (40)) a rozptylování (dithering (41)). Jelikož je cílem této práce posunout obor laserového gravírování fotografií do dřeva dále v jeho vývoji, neuvažuje návrh systému zmíněnou metodu. I přes velmi značné ztížení celého procesu, pracuje výsledný systém řízení se skutečnými odstíny dřeva, nikoliv pouze s jejich optickým klamem. Bude-li navržený systém schopen řídit celý výrobní proces, včetně optimalizace kvality, výrazně tak zvýší výrobní kvalitu vzhledem k současné konkurenci na trhu. Jelikož je zapotřebí přesně řídit výsledné odstíny, které se mění s druhem dřeva (28), aktuálními vlastnostmi dřeva (9) a způsobem zpracování (11), je nezbytné zavést do výrobního procesu zpětnou vazbu. Velký důraz je v systému kladen na optimalizační funkce a opakovatelnost celého procesu pro různé povrchy a různé vstupní grafiky (včetně fotografií s nízkým rozlišením).

### 4.1 Motivace návrhu

V dnešní době lze dosáhnout vysoké kvality vygravírované fotografie. Při využití polovodičových záříčů (které je možné přesně a rychle řídit) lze po získání základních znalostí výrobního procesu, velmi rychle uspět. Při reálné výrobě velmi brzy nastanou zásadní komplikace. Ty jsou tvořeny především nízkou kvalitou vstupní grafiky (rozlišení, kontrast, úroveň detailů), změnami podmínek výrobního procesu (teplota, vlhkost, rozostření paprsku, degradace záříče) a nehomogenitou zpracovávaného dřeva (každý strom má jiné vlastnosti, strukturu a škálu odstínů).

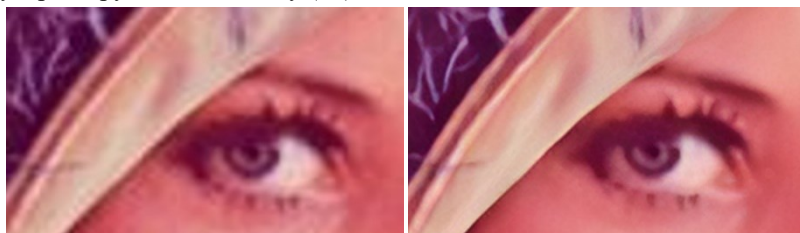
Návrh nového systému řízení má za úkol dosáhnout nejlepší možné kvality přenosu odstínů vstupní fotografie na dřevo pomocí zaostřeného paprsku světla. Je zapotřebí provést řadu funkcí v rámci každého výrobního procesu. Jedná se tyto funkce

- Dopočítávání informací pro fotografie s nižším rozlišením pomocí neuronových sítí
- Filtrace vstupní grafiky ve frekvenční i prostorové oblasti
- Nastavení výkonové charakteristiky záříče
- Optimalizace výrobního kódu s ohledem na znalost výrobního stroje
- Optimalizace výkonové hustoty záříče pro dodatečné navýšení počtu výsledných odstínů
- Automatizovaný sken kalibračního testu odstínů

- Optimalizace ostrosti přechodů vstupní grafiky na základě kalibračního testu
- Simulace výsledného vzhledu výrobku
- Kalibrace histogramu vstupní grafiky na základě simulace

Návrhy všech těchto částí jsou blíže představeny v následujících podkapitolách a některé pak zvláště detailněji popsány v samostatných kapitolách.

Jedním z důležitých kvalitativních indikátorů digitální fotografie je její rozlišení. Celkový počet pixelů přímo ovlivňuje kvalitu fotografie a jednotlivých detailů. Navržený systém využívá dopočetění pixelů fotografie pomocí neuronové sítě (obr. 4.1). Taková síť se nejprve naučí rozdíly mezi milióny fotek s vysokým rozlišením a milióny fotek s nízkým rozlišením. Zmíněná funkce je důležitým kamenem navýšení výrobní kvality. Neuronová síť nebyla vytvořena v rámci této práce, má jiného autora, proto její detaily a principy nebudou řešeny (43).



Obr. 4.1 - Srovnání zvýšení rozlišení obrázku (vlevo bez dopočetění detailů, vpravo s dopočetěním)

Zásadním prvkem popisovaného návrhu systému řízení pro gravírovací stroje je zajištění zpětné vazby. Ta je realizována automatizovaným skenem pomocí průmyslové kamery a žádané optiky. Kalibrační škála odstínů se skládá z deseti výkonových úrovní vypálených v rohu každého výrobku. Zpětná vazba reálných odstínů se pak dále v systému využije pro nastavení výkonové charakteristiky zářiče, nastavení masky frekvenčního filtru (ostrost grafiky), predikci hotového výrobku a úpravě histogramu vstupní grafiky.

## 4.2 Schéma navrženého systému řízení

V kapitole 3 byly popsány hlavní cíle, který má navržený systém řízení přinést. Jedná se o řadu funkcí, které vzájemným propojením vytváří jednotný a plně automatizovaný systém. Jedná se o přístup, který spojuje různé etapy výrobního procesu do jednoho celku a využívá jejich vstupní a výstupní informace k dosažení optimální kvality. Předvýrobní příprava, která tak mohla v krajních případech zabrat i hodiny práce, je zahrnuta v systému a zabere jen několik sekund. Z dynamického růstu, který tato práce v posledních třech letech zaznamenala, je zřejmé, že výzkum a vývoj tohoto systému nekončí a postupem času bude docházet k jeho zdokonalení. Současný stav systému, jeho schéma, propojení a základní princip funkčnosti je vidět na obr. 4.2.

Kromě několika externích softwarů, jsou všechny části systému vytvořeny v prostředí MATLAB. Jedná se o provázané simulační modely a skripty. Souhrn zmíněných funkcí a podsystémů lze pro zjednodušení rozdělit do několika skupin. Jedná se o skupiny

systémů, zajišťující: zpracování vstupní grafiky, tlumení vibrací, kalibrační systém, výrobu a řízení stroje, simulaci hotového výrobku a zpětnou vazbu odstínů.

**Zpracování vstupní grafiky** je první skupinou funkcí, které byly navrženy. Dopočtená grafika prochází filtrací, kde se po odbarvení (převod do odstínů šedé) a s prvotním nastavení (vygenerované na základě předchozích zkušeností systému) provede filtrace histogramu. Grafika je dále převedena do frekvenční oblasti, kde je aplikován filtr dolní propust pro nastavení frekvencí přechodů vhodných pro laserové gravírování do dřeva. Další filtrace pak probíhají až na základě zpětné vazby histogramu simulace a ostrosti přechodů z kalibračního vzorku.

**Tlumení vibrací** se v této práci objevuje jako reakce na současný trend řešit nedokonalosti mechanických vlastností komplexností řízení (automatická kalibrace 3D tiskáren, brzdící ABS systém a další). Tento systém má za úkol stanovit optimální frekvenci výrobního kroku pro daný stroj.

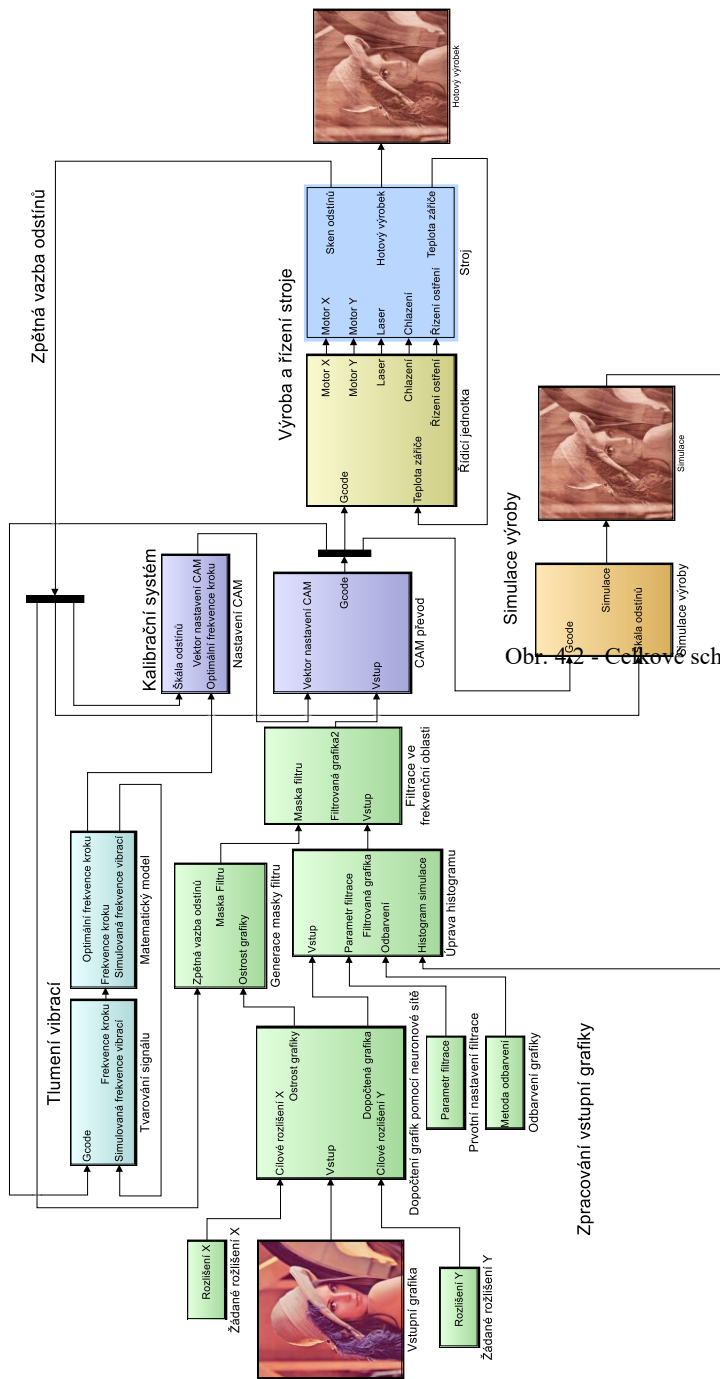
**Kalibrační systém** je skupina funkcí, která v celkovém blokovém schématu zabírá nejméně místa, přesto zde probíhají výpočetně nejnáročnější a nejkomplexnější funkce. Kalibrační systém má celkem 3 vnější vstupy a pouze jeden výstup. První vstupem je škála odstínů, dalším je optimální frekvence výrobního kroku a třetí je vstupní fotografie. Výstupem je hotový výrobní kód.

**Výroba a řízení stroje** popisuje realizační část celého systému. Zde se již jedná o reálné komponenty, které vykonávají sérii instrukcí výrobního kódu. Výrobní kód (G-Code) je zde jediným vstupem, jelikož se předpokládá, že všechna potřebná data a parametry budou obsaženy v tomto výrobním kódu. Laboratorní model stroje je blíže popsán v kapitole 5.

**Simulaci výroby** zajišťuje vytvoření matice obrázku, která predikuje výsledný výrobek. Tato funkce využívá dva vstupy. Jedná se o škálu odstínů, vytvořenou a zpracovanou kalibračním systémem, a výrobní kód. Díky těmto datům je možno rekonstruovat celou fotografii podle dodané palety odstínů. Tato simulace se pak dále použije pro porovnání histogramu s aktuální vstupní grafikou a finální kontrolu uživatele, který takto může dohlížet na celý proces ještě před výrobou.

**Zpětná vazba odstínů** je v podstatě součástí kalibračního systému. Jedná se o funkci, která poskytuje celému systému potřebné informace pro řízení kvality. Je realizována průmyslovou kamerou s přesnou optikou, která skenuje kalibrační vzorek z každého podkladu dřeva pro výrobu.

Schéma celého návrhu řídicího systému pro gravírování dřevěných fotografií do dřeva je vykresleno na obrázku.



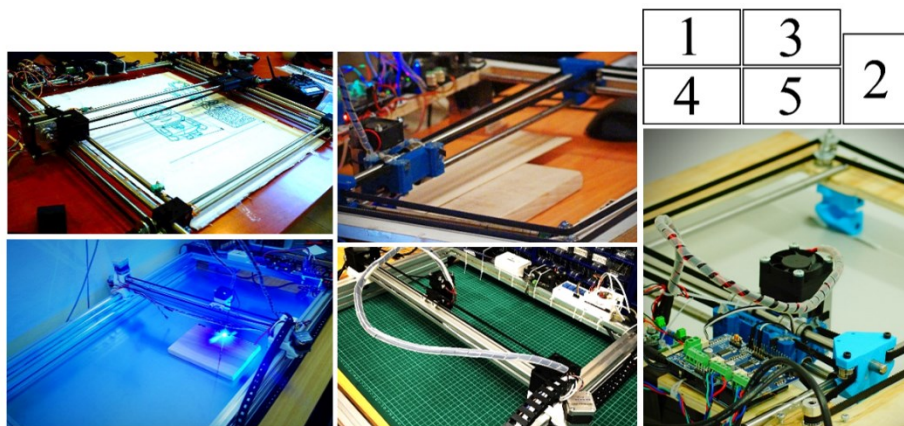
Obr. 4.2 – Celkové schéma navrženého řídicího systému

## 5 MODEL GRAVÍROVACÍHO STROJE

Pro testování a ovládnutí návrhu řídicího systému byly sestaveny laboratorní modely CNC gravírovacích strojů. V průběhu tří let bylo sestaveno celkem 6 verzí. Další verze (sedmá) se navrhovala během finálních testů a bude realizována pro obhajobu této práce. První verze byly navrženy pro postupné, rychlé a levné ověřování jednotlivých fází.

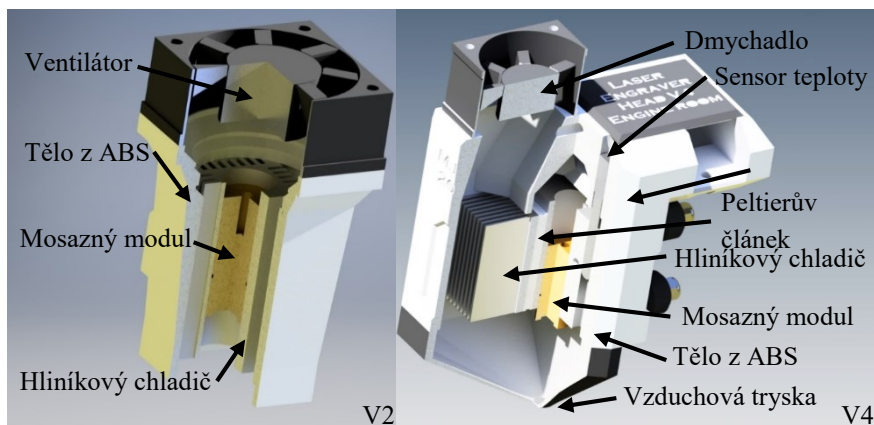
### 5.1 Laboratorní model

Pro realizaci laboratorního modelu byl vybrán open-source firmware díky možnosti jednoduché modifikace. Bylo otestováno několik obdobných systémů, které jsou vhodné pro gravírovací stroje, a poté byl zvolen výsledný systém. Pro řízení laboratorního modelu gravírovacího plotteru byl zvolen GRBL řídicí firmware. Řídicí jednotkou byla z počátku vývojová deska Arduino UNO, později pak Arduino MEGA 2560. Na této desce je zapojena přídavná deska, která rozvádí jednotlivé piny mikročipu na odpovídající vstupní piny driverů pro krokové motory Pololu A4988, později TMC 2130. Deska dále propojuje řídicí mikročip se spínáním výkonových obvodů a řídicí elektronikou laseru. Krokové motory, byly použity s velikostí příruby NEMA 17 a s typovým označením SX17-1005VLQCEF. Jednotlivé verze laboratorních modelů jsou na obr. 5.1.



Obr. 5.1 - Některé verze laboratorních modelů. 1 – Model pro testování pozicovacích systémů. 2 – Model pro testování CAM systémů. 3 – Model pro testování řízení výkonu laseru. 4 – Model pro testování stability řídicí elektroniky. 5 – Model pro testování v různých okolních podmínkách.

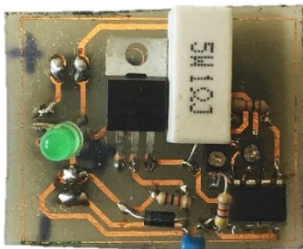
Pracovní hlava (obr. 5.2) byla nejčastěji předělávána komponenta v rámci vývoje. Je složena z aktivního i pasivního chladiče, ve kterém je umístěn mosazný náboj, který nese laserovou diodu. Tento náboj obsahuje měděnou koncovku. Ta pomáhá odvádět teplo zářiče. Pro zajištění pracovních podmínek daných výrobcem laseru byla použita teplovodivá pasta mezi diodou a měděnou koncovkou i mezi mosazným nábojem a hliníkovým chladičem. Laserové diody, které byly využity v laboratorních modelech, byly do čtvrté verze modelu s typovým označením M140 další, pak NUBM44-V2. Výrobcem je japonská firma NICHIA. Jelikož je vhodné udržovat laserovou diodu při konstantní teplotě a nezbytné zabránit jejímu přehřátí, byly postupně nasazeny sofistikovanější varianty chlazení.



Obr. 5.2 - Vývoj laserové pracovní hlavy. Vlevo verze 2, vpravo verze 4, která byla optimalizována na práci v proměnlivých okolních podmínkách a přesné řízení teploty zářiče

**Řídicí elektronika** pro gravírovací laser je složena ze dvou částí. První část je běžná CNC řídicí jednotka, která se stará o pozicování pracovní hlavy stroje. Řeší jednotlivé polohy, kterých má stroj v daném čase a rychlosti dosáhnout. Tato jednotka ve formě G-Code přijímá jednotlivé souřadnice, a ty na základě aktuální polohy rozkládá do řídicích pulsů, jejichž informace předává driverům krokových motorů. Ty mají za úkol přijaté informační impulzy co nejpřesněji převést do výkonových proudových pulzů. Běžné krokové motory se používají bez zpětné vazby. Proto byl v rámci této práce vytvořen matematický model, aby bylo možno velmi rychle a automatizovaně vyhodnotit, při jakých rychlostech dojde ke ztrátě kroku a tím i ztrátě přesnosti výrobku. Hlavním úkolem řídicích obvodů (obr. 5.3) laserové diody je dodávat elektrický proud. Polovodičové zářiče však patří k velmi citlivým součástkám. Jsou velmi náchylné na kvalitu vstupního proudu. Takový proud by měl být vyhlazený od šumu a neobsahovat proudové špičky. Pro zvýšení životnosti zářiče obsahují drivery celou řadu vestavěných funkcí. Mezi ně patří například teplotní pojistky, které vypnou driver, pokud dojde k přehřátí řídicích obvodů, či samotné laserové diody. Velmi důležitým prvkem je

pozvolný start (soft-start), který zajišťuje pomalý náběh proudu procházejícího diodou. Tento prvek zvyšuje životnost diody a vyhýbá se různým špičkám, které mohou být spojeny se sepnutím obvodu. Dalšími funkcemi jsou ochrana proti elektrostatickému výboji a přepólování.



Obr. 5.3 – Laserový driver navržený pro první testovací modely.

## 5.2 Matematický model CNC stroje

Dynamická charakteristika je jedním ze základních aspektů, ke kterým je třeba přihlédnout u návrhu CNC výrobních strojů. Identifikací a simulací chování krokového motoru na žádaný vstup můžeme sledovat jeho předpokládaný akční zásah do systému. Díky tomu lze definovat optimální hodnoty parametrů systému, jeho limity i slabá místa. Tento model také pomůže poukázat na konstrukční změny, vedoucí k lepší výkonnosti a spolehlivosti stroje. Tato strategie může výrazně snížit náklady na konstrukci stroje. Detailní znalost stroje totiž poukáže na slabá místa, která je nutno předimenzovat, a zároveň odhalí části, které nejsou pro kvalitu stroje tak důležité. Další možností je vhodná úprava řízení, která zvýší kvalitu výsledného procesu. Vlastnosti stroje totiž lze promítnout do samotného řízení a dopředu s nimi počítat.

Laboratorní modely navržené a sestavené pro tuto práci využívají hybridní krokové motory. Hybridní krokový motor se svou konstrukcí pohybuje mezi PM (Permanent Magnet) krokovým motorem a VR (Variable Reluctance) krokovým motorem. Najdeme v něm jak jádro z permanentního magnetu uložené v rotoru, tak jemné ozubení jednotlivých cívek statoru. Krokový motor funguje na principu elektromagnetické a magnetické síly, vznikající mezi statorem a rotorem. Jeho přenos můžeme odvodit podle dostupných zdrojů (43), (44). Odvození vychází z intenzity magnetického pole

$$H_g = \frac{nI}{g} \quad (5.1)$$

kde  $n$  je počet závitů cívky,  $I$  je proud procházející cívkou a  $g$  je mezera mezi statorem a rotorem (gap). Dále vyjádříme magnetický tok

$$\Phi = \frac{xw\mu_0 nI}{g} \quad (5.2)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vzduchu,  $x$  je podélná délka, a  $w$  je tloušťka, na sebe působících zubů. Následně je odvozena pohybová rovnice

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi I_A \sin p\theta + pn\Phi I_B \sin p(\theta - \lambda) = 0 \quad (5.3)$$

kde  $D$  je koeficient viskózního tření,  $J$  je moment setrvačnosti,  $p$  je počet párů magnetického pole,  $\theta$  je úhel rotace a  $\lambda$  je rozteč zubu. Následnou linearizací a úpravou lze vyjádřit přenos krokového motoru (43), (44)

$$G(s) = \frac{\Theta_0(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{2p^2\Phi n I_0}{(Js^2 + Ds + 2p^2\Phi n I_0)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \frac{D}{J}s + \omega_n^2} \quad (5.4)$$

Dosažením parametrů pak získáme přenos konkrétního motoru. Některé parametry lze získat od výrobce, další je třeba odměřit a dopočítat po rozebrání motoru (obr. 5.4).



Obr. 5.4 - Měření skutečného odporu krokového motoru

Po sérii výpočtů získáme vyčíslené přenosy krokových motorů pro jednotlivé osy konkrétního stroje.

$$G_{mx}(s) = \frac{990,008^2}{s^2 + \frac{1}{29,621 \cdot 10^{-6}}s + 990,008^2} \quad (5.5)$$

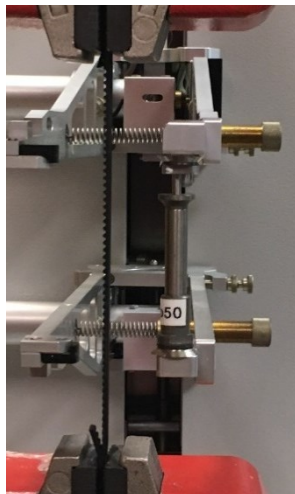
$$G_{my}(s) = \frac{310,992^2}{s^2 + \frac{1}{300,177 \cdot 10^{-6}}s + 310,992^2} \quad (5.6)$$



Kromě dynamických vlastností krokového motoru s řemenicemi, řídicí jednotky a výrobního kódu, ovlivňují kvalitu výrobního procesu i dynamické vlastnosti řemenu.

Pro získání přenosu ozubeného řemenu je třeba určit jeho tuhost a koeficient tlumení. Výpočtu koeficientu tuhosti byl proveden na profesionálním stroji určeném pro tahové zkoušky s označení M500-50CT. Byly vyzkoušeny celkem tři typy běžně dostupných GT2 ozubených řemenů, které se ve značném množství používají v méně namáhaných CNC strojích, jako jsou 3D tiskárny, či laserové plotry. Stroje byly podrobeny tahové zkoušce, která skončila jejich selháním (obr. 5.5).

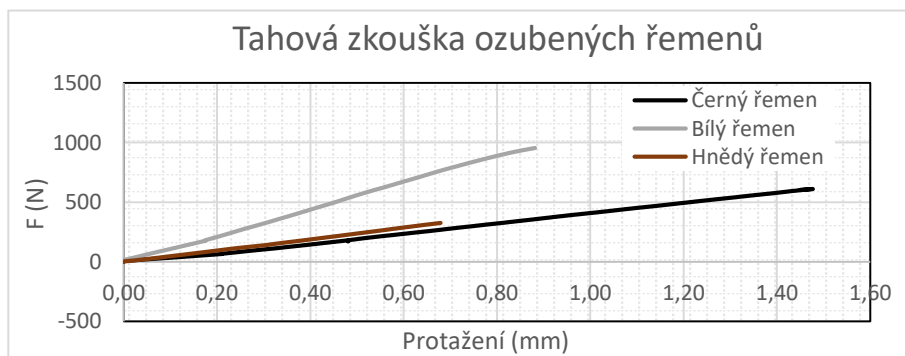
Z výsledků je patrné, že řemeny mohou mít velmi odlišné koeficienty tuhosti i pevnosti v tahu viz. tab. 5.1 a obr. 5.6. Porovnány byly tři typy řemenů. První typ řemenu, který je označen jako černý, je pryžový řemen s textilními vlákny. Tento řemen vykázal největší protažení a střední pevnost. Dalším vzorkem byl bílý řemen, který je vyroben z polyuretanu a obsahuje ocelová vlákna. Tento řemen vykázal největší pevnost i největší tuhost. Poslední řemen je vyroben z polyuretanové směsi s menší tloušťkou a tenčími výztuhami.



Obr. 5.5 - Tahová zkouška

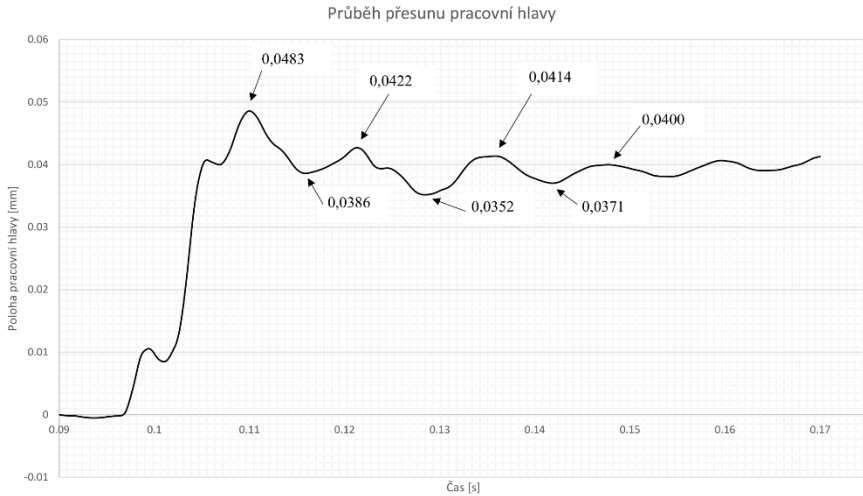
Tab. 5.1 - Výsledky tahové zkoušky

Řemen	Tuhost ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ )	Max. síla (N)
Černý řemen	390,20	609,7
Bílý řemen	1097,67	955,1
Hnědý řemen	471,19	326



Obr. 5.6 - Graf výsledků tahových zkoušek ozubených řemenů

Tlumení je odvádění kinetické energie z materiálu, nebo systému, který je vystaven namáhání formou tepla. V oblasti teorie automatického řízení je kmitavá vlastnost systému určena tzv. koeficientem tlumení, jinak nazývaným také jako poměrné tlumení. Druhé měření řemenu je zaměřeno právě na koeficient tlumení. Pomocí velmi přesného laserového měření vzdálenosti byl změřen průběh pohybu pracovní hlavy stroje. Použité zařízení má označení Ometron VH-1000-D. Na obr. 5.7 je zobrazena přechodová charakteristika přesunu pracovní hlavy.



Obr. 5.7 - Průběh přesunu pracovní hlavy.

Výsledný koeficient tlumení pro pryžový řemen s textilními vlákny zavedený do gravírovacího stroje je  $\zeta = 0,705$ . Přenos získáme dosazením naměřených hodnot do rovnic

$$\frac{1}{ms^2 + bs + k} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{b}{k}s + 1} = \frac{k_1}{T_0^2 s^2 + 2T_0\zeta s + 1} \quad (5.7)$$

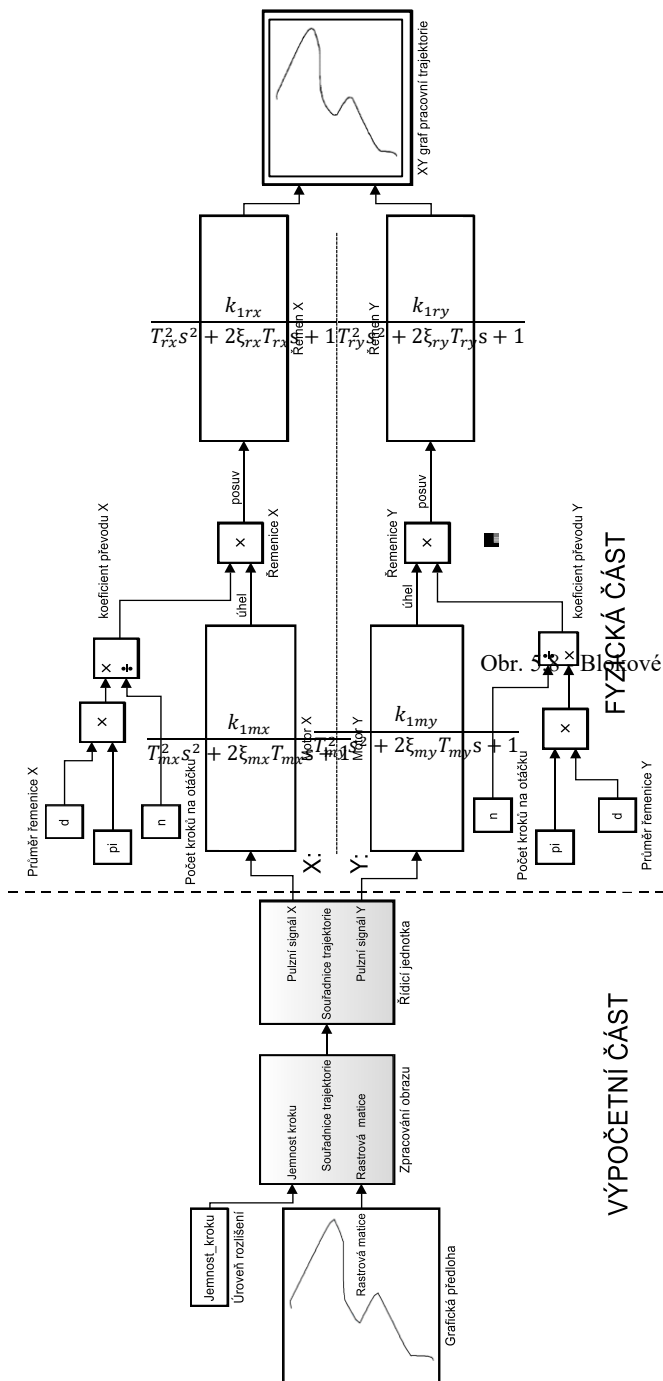
$$T_0 = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad a \quad 2T_0\zeta = \frac{b}{k} \quad (5.8)$$

Výsledné přenosy pro obě osy jsou následující

$$G_{rx}(s) = \frac{2,56 \cdot 10^{-6}}{5,13 \cdot 10^{-7}s^2 + 0,001s + 1} \quad (5.9)$$

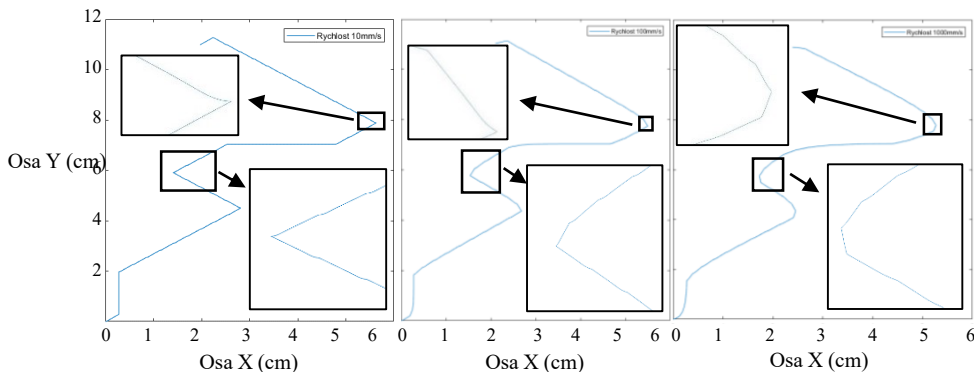
$$G_{ry}(s) = \frac{2,56 \cdot 10^{-6}}{5,13 \cdot 10^{-6}s^2 + 0,0032s + 1} \quad (5.10)$$

Vytvořený model je na obr. 5.8.



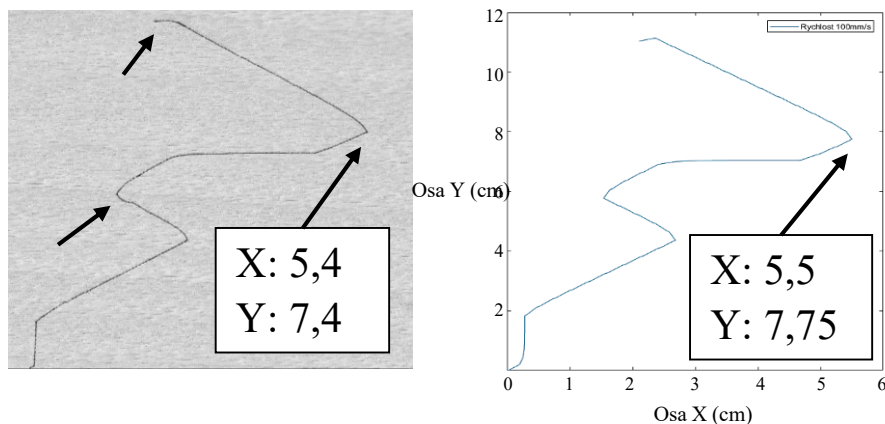
Obr. 5.3. Black boxové schéma matematického modelu

Doplněním o dynamiku jednotlivých řemenů lze pozorovat zásadní změny ve výsledcích simulace. Již při pomalých rychlostech lze ve všech pohybech pozorovat různé dynamické vlastnosti obou os. Při zvýšení pracovní rychlosti je tento jev zřetelnější. Teoreticky se tedy dá předpokládat, že dynamika řemenu vnáší do pracovního výsledku větší nepřesnosti než samotná dynamika krokových motorů.



Obr. 5.9 - Srovnání modelovaných trajektorií (zleva 10 m/s, 100 m/s a 1000 m/s)

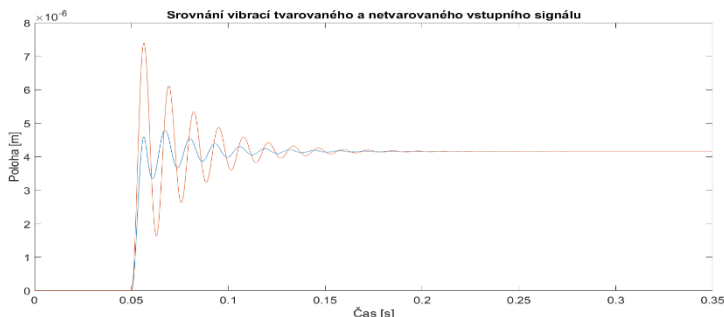
Jednotlivé rychlosti modelovaných trajektorií jsou na obr. 5.9. Srovnání s reálnou trajektorií je na obr. 5.10. Modelovaná trajektorie poměrně věrohodně kopíruje reálnou. Nicméně v reálné trajektorii se objevují i další nepřesnosti, které modelovaná trajektorie nebyla schopna předpovědět. Přesto je matematický model velmi dobře použitelný pro testování a optimální nastavení parametrů a rychlostí konkrétního stroje.



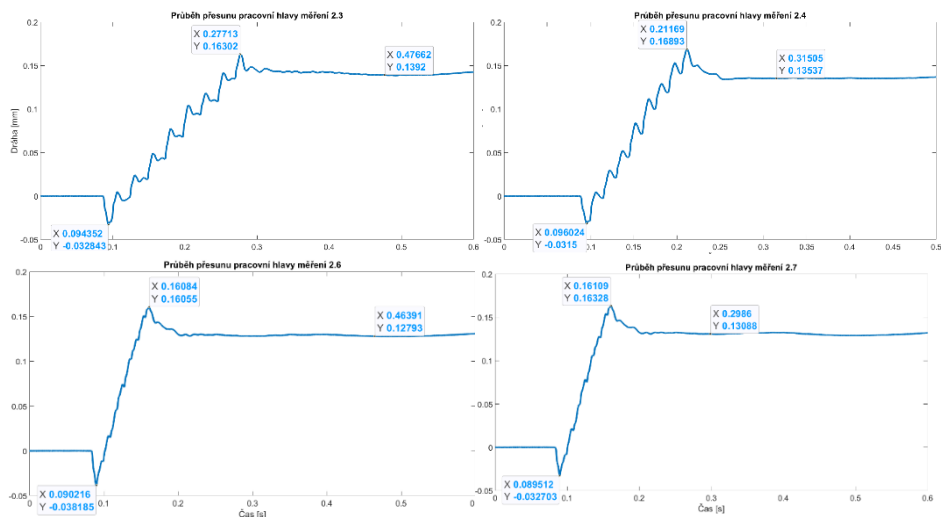
Obr. 5.10 - Srovnání reálné trajektorie (vlevo) s modelovanou (vpravo)



Aby bylo možné otestovat metodu vhodného tvarování vstupního signálu byl vymodelován porovnávací model v prostředí Matlab Simulink. Tento model je vyobrazen na obr. 6.1. Jak již bylo popsáno v tomto modelu se vyskytují dva totožné modely pojezdu pracovní hlavy. Na oba dva modely byl přiveden vstupní skokový signál a jejich odezva zapsána do grafu. První model prochází logickými funkcemi, které byly definovány maticí Z-V Shaperu. Jedná se o rozdělení vstupního pulsu na dva menší a zpoždění menšího pulzu o vypočtené dopravní zpoždění. Díky tomu přichází do systému druhý impuls, který působí proti vibracím a snižuje jejich amplitudu.



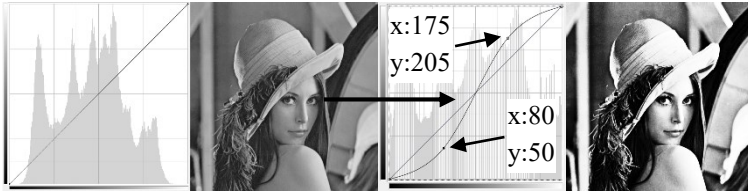
Obr. 6.2 - Graf srovnávající vibrace tvarovaného (modrá) a netvarovaného (červená) signálu. Z testování matematického modelu, které je vyobrazeno na obr. 6.2, bylo možno dosáhnout snížení amplitudy prvního kmitu až o šestinásobek při porovnání s netlumenou částí modelu. Jedná se o velmi zásadní změnu. Nicméně tato aplikace se týká pouze matematického modelu, který využívá ideální prvky a neuvažuje spoustu dalších prvků celého stroje. Reálný výsledek je na obr. 6.3



Obr. 6.3 - Měření dopadu tlumení vibrací na reálný stroj

## 7 FILTRACE GRAFICKÝCH PODKLADŮ

Kapitola popisuje automatizovanou metodu filtrace vstupní grafiky. Filtrace probíhá v prostorové a frekvenční oblasti. Klíčovým přínosem je otestované přednastavení filtrací a jejich provázání s kalibračním vzorkem zpětné vazby. První část se zabývá filtrací histogramu. Byly testovány desítky úprav histogramu, nejlepšího výsledku bylo dosaženo kombinací ekvalizace histogramu a následného zvýšení kontrastu. To sice sníží počet odstínů, nicméně dojde ke zvýšení kontrastu což zvýší kvalitu histogramu výrobku. Křivka, definující výslednou úpravu by neměla protnout kritickou křivku tvořenou dvěma body [175,205] a [80,50] s inflexním bodem v [127,127] viz. obr. 7.1.



Obr. 7.1 - Úprava histogramu pro aplikaci laserového gravírování

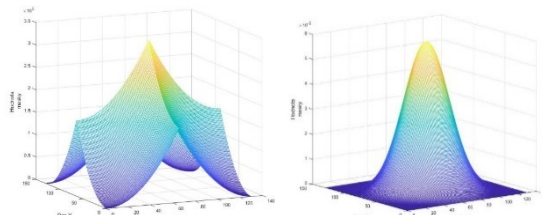
Pro filtraci ve frekvenční oblasti je zapotřebí potřebnou grafiku nejprve převést pomocí dvourozměrné diskrétní Fourierovy transformace. Ta má tvar

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (7.1)$$

kde  $f(x, y)$  je matice grafického podkladu a  $F(u, v)$  je její obraz ve frekvenční oblasti. Exponent Fourierovy transformace je možno rozšířit na jeho sinové a kosinové složky, kdy proměnné  $u$  a  $v$  definují jejich jednotlivé frekvence (45). Pro přenos matice dat zpět do prostorové oblasti se využívá výpočtu inverzní Fourierovy transformace, který je definován následovně

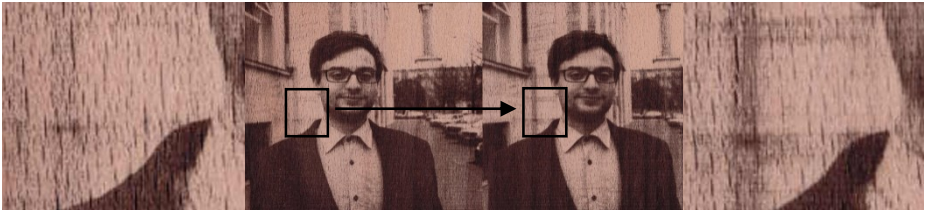
$$F(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (7.2)$$

I ve frekvenční oblasti bylo provedeno několik desítek testů. Nejlepší výsledky byly dosaženy aplikací low-pass filtru s využitím Laplaceovy a Gaussovy masky (obr. 7.2).



Obr. 7.2 - Srovnání 3D grafů masek filtrů (vlevo Laplaceova, vpravo Gaussova maska)

Navržené filtrace jsou schopny nejen selektivně redukovat nevyrobitelné informace vstupní grafiky, ale zvyšují kvalitu kritických přechodů a detailů. K tomu dochází díky navýšení průměrné energie zmíněných přechodů. Ty filtrace ztratí svou ostrost, ale ve výsledném výrobku nezaniknou. Srovnání dopadu filtrace na detaily gravírované grafiky je demonstrována na obrázcích obr. 7.3 a obr. 7.4.









Obr. 7.3 - Srovnání podkladů a detailů (vlevo originály, vpravo filtrované)



Obr. 7.4 - Srovnání vygravírovaných detailů 1 (vlevo originál, vpravo filtrovaný)

Srovnání masek, které dosahovaly nejlepších výsledků redukce výrobního kódu během prováděných testů, je rozvedeno v tab. 7.1. Ze srovnání úspory výrobního kódu a kvality výstupu vyšla nejlépe varianta low-pass filtrace s maskou, která je nazývána jako Laplaceova maska. Ta byla použita i na filtraci grafik v z obr. 7.4 a obr. 7.3.

Tab. 7.1 - Srovnání masek s nejlepšími výsledky testů

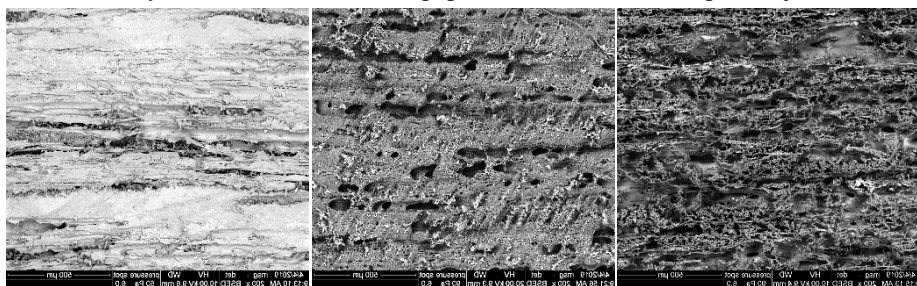
Výstup	Maska	G-kód	Úspora	Výstup	Maska	G-kód	Úspora
	Čtverec (50,50)	389 kB	-12,9 %		Laplace	312 kB	-30 %
	Čtverec (20,20)	387 kB	-12,7 %		Gauss. (1)	311 kB	-30,8 %
	Kruh (20)	382 kB	-12,7 %		Gauss. (10)	339 kB	-22,5 %



## 8 AUTOMATICKÁ KALIBRACE

Do výsledné barvy odstínů a kvality výrobku vstupuje řada faktorů. Jedná se především o degradující a teplotně závislou výkonovou charakteristiku zářiče, proměnné parametry dřevěného podkladu a různorodost vstupních fotografií. Principem automatické kalibrace je vygravírovat vzorek škály odstínů před každou výrobou vypalované fotografie. Naskenovaná zpětná vazba pak je použita pro kompenzaci výše zmíněných poruchových veličin a optimalizaci filtrace vstupní grafiky.

Úlohou expertního systému automatické kalibrace je poskytnout i nastavení výkonové charakteristiky zářiče a řízení zaostření paprsku. Vliv zaostření na povrch je na obr. 8.1.



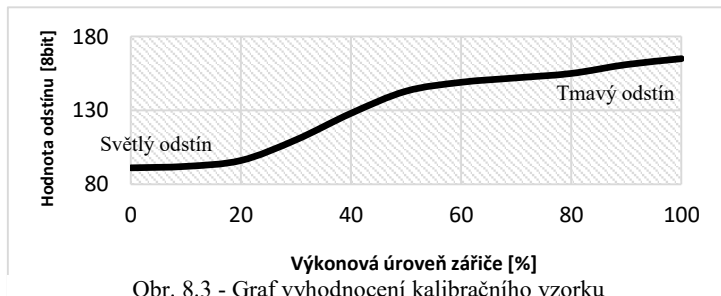
Obr. 8.1 – Přibližné snímky (200x). Zleva laserem neopracovaný povrch, opravený zaostřeným paprskem a opracovaný rozostřeným paprskem

Kalibrační vzorek tedy poskytuje do řídicího systému zpětnou vazbu a částečně tak obchází potřebu přesně měřit aktuální výkon zářiče a vlastnosti povrchu dřeva. Vzorek je názorně vykreslen v obr. 8.2.



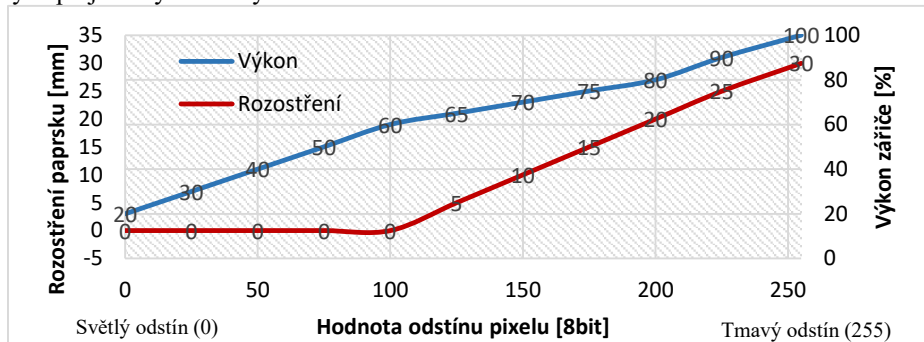
Obr. 8.2 - Předloha a reálný výsledek gravírovaného vzorku pro automatickou kalibraci.

Závislost odstínu povrchu na výkonu zářiče je na obr. 8.3.



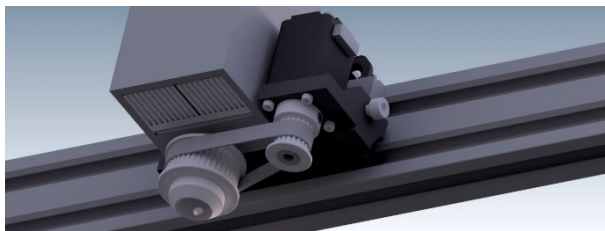
Obr. 8.3 - Graf vyhodnocení kalibračního vzorku

Kalibrační skript vychází z expertních znalostí získaných na základě série všech testů vypracovaných během tvorby této disertační práce. Skládá se ze tří částí. První část má za úkol vhodně rozpoznat a odstříhnout skupinu výkonových hodnot, které nepřinášejí rozdíl pro odstín vygravírovaného dřeva. Druhá část se zabývá intervalem, ve kterém dochází k největším změnám výsledného odstínu. Poslední část se zabývá rozostřením paprsku pro ještě intenzivnější ztmavení povrchu. Výstupní hodnoty kalibrovaného výstupu jsou vyobrazeny na obr. 8.4.



Obr. 8.4 - Graf navržených kalibračních parametrů expertním systémem

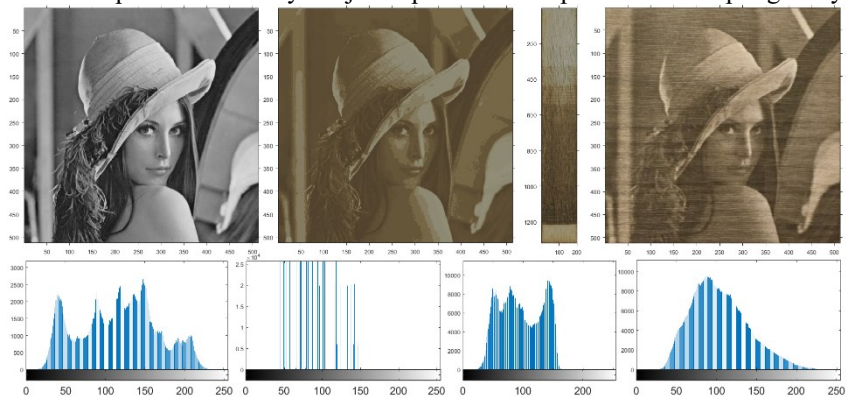
Z grafu je patrné, že pro odstíny 0-100 pracuje výrobní stroj pouze s posunutou výkonovou charakteristikou zářiče. Pro tmavší odstíny (100-255) pak již dochází k řízení ostrosti paprsku. Ostření je realizováno krokovým motorem, který je řemenem přímo spojen s čočkou laserového modulu viz. obr. 8.5. Pro dosažení všech navržených úrovní ostření je zapotřebí přestavit čočku pouze o půl otáčky krokového motoru.



Obr. 8.5 - Umístění krokového motoru pro řízení zaostření laserového paprsku na pracovní hlavě

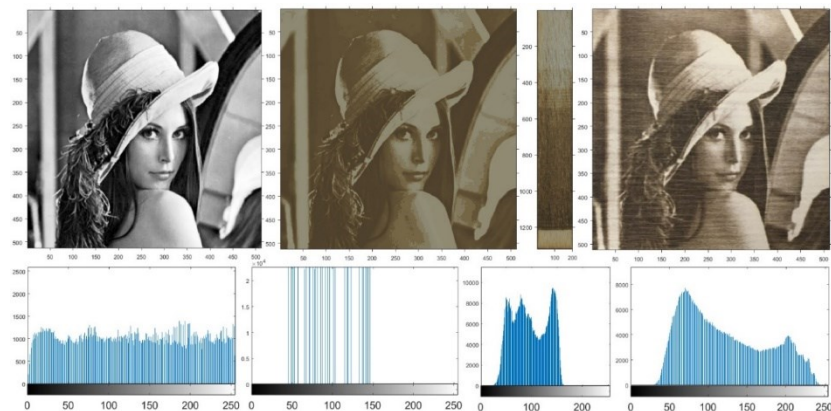
## 9 SIMULACE GRAVÍROVANÉ FOTOGRAFIE

Technologie laserového gravírování je zdoluhavý a často nevratný proces. Vizualní simulace dlouhodobě zvýší kvalitu výroby a sníží náklady. Lze pozorovat budoucí rozložení jednotlivých odstínů, jejich prolnutí a kontrasty detailů. Navíc, šířka simulačního histogramu určí počet dosažitelných odstínů. Histogram předpokládaného výsledku lze optimalizovat a využít jako zpětnou vazbu pro filtraci vstupní grafiky.



Obr. 9.1 - Srovnání gravírovacího procesu. Zleva je vyobrazena vstupní grafika, simulace, kalibrační sken a vypálený obrázek. V druhém řádku je pod konkrétní grafikou vyobrazen její histogram.

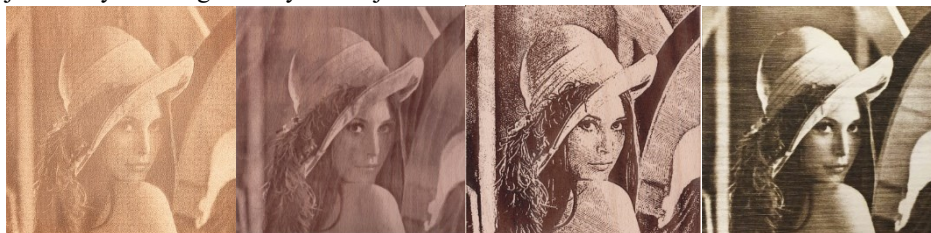
Na obr. 9.1 je vyobrazen první příklad výroby gravírované fotografie včetně kalibračního skenu odstínů a jeho odpovídající simulace. Vstupním podkladem je fotografie, která nebyla pro případ laserového gravírování nijak speciálně upravena. Ke srovnání je přiložena i simulace grafiky po aplikaci filtrace z kapitoly 7 (obr. 9.2). Lze pozorovat změny histogramu simulace i výrobku.



Obr. 9.2 - Srovnání gravírovacího procesu. Zleva je vyobrazena vstupní grafika, simulace, kalibrační sken a vypálený obrázek. V druhém řádku je pod konkrétní grafikou vyobrazen její histogram.

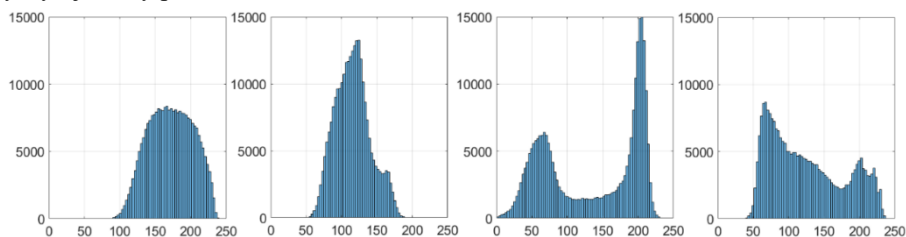
## 10 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NAVRŽENÉHO SYSTÉMU

Hlavním přínosem zpracovaného návrhu systémů řízení je jeho důsledný přístup ke všem dílčím oblastem laserového gravírování fotografií do dřeva. Úloha, v současné době řešená pouze výrobním strojem, je nyní propojena i s přípravou vstupní grafiky, vlastnostmi aktuálního povrchu dřeva, degradací zářiče a simulací výrobku. Zmíněné propojení je realizováno sérií zpětných vazeb. Těmi jsou aktuální výkonová charakteristika zářiče, ostrost vypáleného bodu, paleta odstínů kalibračního vzorku a histogram simulovaného výsledku. Navržený postup prokázal již při prvním testování lepší výsledky než současná konkurenční řešení. Srovnání výsledného vzhledu a jednotlivých histogramů výsledku je na obr. 10.1 a obr. 10.2



Obr. 10.1 - Srovnání současného stavu gravírování fotografií do dřeva. Obrázek A – CO<sub>2</sub> laser od Holandské firmy BRM Lasers; obrázek B – CO<sub>2</sub> laser polského dodavatele; obrázek C – CO<sub>2</sub> laser české designové firmy; obrázek D – fotografie vyrobená na laboratorním modelu, zatím bez řízení karbonizace.

Ze srovnání obrázků lze vidět, že navržený systém řízení opravdu poskytuje věrohodnější barvy a kvalitu přenosu fotografie. To lze potvrdit i ze srovnání histogramů. S přihlédnutím k šumu a nepřesnostem skenů lze považovat čtvrté řešení jako to nejkvalitnější. Důvodem je velké množství různých odstínů a jejich rovnoměrné rozložení po celé jejich šířce. První dva vzorky mají výrazně nižší počet různých odstínů a třetí výsledek má ve své podstatě pouze dvě hlavní hodnoty, kolem kterých se vyskytuje malý počet variací.



Obr. 10.2 - Histogramy skenů laserem vygravírovaných fotografií. Zleva histogramy třech komerčních řešení CO<sub>2</sub> laserů, čtvrtý je histogram navrženého řešení.

## 11 ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na návrh systémů řízení CNC laserového gravírování. Měla za úkol prozkoumat technologii laserového gravírování fotografií na dřevěný podklad a navrhnout prostory pro zlepšení výrobní kvality. Proto je úvodní část zaměřena na popis současného stavu. Na to, jaké existují řešení laserových zářičů a jaké metody úpravy a výroby se v dnešní době využívají při laserovém gravírování fotografií. Byla definována úzká místa a problémy, se kterými se daná technologie dlouhodobě potýká. Na základě toho byl navržen a podrobně popsán návrh řídicího systému, který povede ke zlepšení gravírovacího procesu. Celý systém se skládá z řady podsystémů. Jeho hlavní inovace nespočívá až tak v komplexním zpracování jednotlivých částí, ale především v jejich vzájemném propojení do jednoho celku. Základním kamenem systému je přidání kalibrační zpětné vazby, která u většiny profesionálních řešení stále není využita.

Zpětná vazba umožňuje díky expertnímu systému automatické kalibrace nastavit výrobní parametry tak, aby kompenzovaly poruchové veličiny. Těmi mohou být třeba degradující charakteristika zářiče, nebo proměnlivé vlastnosti dřevěného povrchu polotovaru. Dále byly provedeny dvě série testování, které měly za cíl odhalit vhodné nastavení parametrů pro maximalizaci dosažitelných odstínů. První testování obsahovalo okolo jednoho tisíce vzorků a jeho přínosem bylo definování parametrů, které ovlivňují výsledný odstín vygravírovaného bodu. Tyto parametry byly vůči sobě důkladně testovány v druhém měření s 96 vzorky. Mezi finální testované parametry byla zařazena okolní teplota, vlhkost, zostření neboť profil laserového paprsku, výkon, rychlost a povrchová úprava. Cílem druhého měření bylo určit parametr, který má na výsledek odstínu největší vliv a bude použit pro první návrh kalibračního systému. Klíčovým parametrem se stalo zaostření neboť profil laserového paprsku. Jedná se o klíčový výrobní parametr laserového gravírování, který lze využít k řízení karbonizace povrchu. Následně byl navržen a realizován algoritmus řídicího systému, který dokáže s tímto parametrem vhodně pracovat.

Jedním z dalších cílů bylo vytvoření systému pro simulaci kvality hotového výrobku. Tato část využívá reálných odstínů z kalibračního vzorku zpětné vazby a na základě vstupní grafiky generuje vzhled hotového výrobku. Kvalita simulace byla otestována pomocí tří vzorků. Srovnaly se vstupní grafiky, simulace a skeny hotových výrobků. Ukázalo se, že i první návrh simulace je velmi přesný. Dokáže odhalit klíčové detaily budoucího výrobku a odhalit, které přechody a jejich odstíny vyniknout a které splynou.

Další oblastí, které se tato práce věnovala bylo vytvoření matematického modelu gravírovacího stroje. Postupně byly identifikovány všechny polohovací komponenty stroje. Krokové motory byly identifikovány na základě informací od výrobce, vlastního měření a dostupných zdrojů. Tuhost ozubeného řemene byla identifikována pomocí dvou měření. Bylo to z toho důvodu, že se první měření ukázalo jako nepřesné. V práci je zmíněno jako příklad nesprávné cesty. Měření tuhosti tak bylo nakonec provedeno na profesionálním trhacím stroji a koeficient tlumení pak pomocí laserového měření polohy. Vše pak bylo následně sestaveno a implementováno do simulačního prostředí

MATLAB/Simulink. Model byl dále otestován a porovnán s reálnými trajektoriemi. Ačkoliv se v reálné trajektorii vyskytovaly při vyšších rychlostech i jiné poruchy, simulační model byl schopen predikovat reálnou trajektorii.

Zmíněný matematický model byl využit i pro otestování algoritmu pro tlumení vibrací krokových motorů. Díky znalosti vlastních frekvencí a teoretické charakteristiky stroje byly provedeny série měření, které sledovaly míru vibrací při výrobě. Na simulačním modelu bylo otestováno tvarování vstupního signálu pro tlumení vibrací s velkým úspěchem. Model vykazoval rychlejší útlum i menší amplitudu vibrací. Při reálném měření se ukázalo, že vibrace je možné při nižších rychlostech tlumit, avšak výsledný útlum se objevuje až o řád později, v porovnání s frekvencí pulzů krokového motoru. Výsledný útlum tak nemá na reálný výrobní proces vliv, projeví se až při vypnutí cívek motoru.

Dalšími systémy, kterými se tato práce zabývala byly filtrace vstupních grafik v prostorové a frekvenční oblasti. Jedná se o úpravy histogramu fotografie a úpravy frekvencí přechodů mezi jednotlivými pixely. Zde bylo dosaženo výrazného posunu výrobní kvality gravírované fotografie a redukce výrobního kódu až o 30 %.

V kapitole 10 byly výsledky zhodnoceny, a srovnány s profesionálním řešením, které je aktuálně dostupné na trhu. Řada systémů má za sebou pouze pár měsíců vývoje a už nyní je zřejmé, že navržený systém dosahuje i ve své počáteční fázi výrazně vyšší kvality. Na základě návrhu řídicích systémů a finálních testů byl navržen nový laboratorní model, který se bude v nejbližších měsících realizovat. Tento model odstraní poslední vady a bude schopen plně a automatizovaně využívat poznatků odhalených v rámci této disertační práce, a ještě více zvýšit výrobní kvalitu.

## 11.1 Přínos pro vědní obor

Práce přináší unikátní příklad tvorby a ověření matematického a simulačního modelu reálného CNC stroje. Popisuje návrh a realizaci tlumení vibrací řízením vstupních signálů. Tento řídicí systém byl důkladně testován a jeho výsledky byly testovány na simulačním i reálném modelu. Popis reálného dopadu tohoto systému na výrobní proces je detailně rozebrán a zhodnocen. V další části se práce zabývá filtrací vstupních grafik včetně frekvenční oblasti, popisuje její dopad na výslednou kvalitu gravírování a velikost výrobního kódu. Návrh automatické kalibrace výkonnostní křivky zářiče přináší nekonvenční přístup řízení CNC laserového gravírování, který lze využít na jakýkoliv stroj na světě. Popis řízení výrobních podmínek k využití procesu karbonizace ve zvýšení výrobní kvality je popsán, byl rozsáhle testován a potvrzen snímky z elektronového mikroskopu.

Práce definuje celou řadu doporučení pro další výzkum a ukazuje na současná slabá místa, která je třeba v následujících letech vyřešit pro další zvýšení kvality laserového gravírování fotografií do dřeva.

## 11.2 Přínos pro praxi

V disertační práci je navržen nový přístup k řízení technologie laserového gravírování fotografií na dřevo. Gravírovací proces je obohacen o kalibrační zpětnou vazbu a demonstruje několik možností jejího využití. Práce definuje celkový systém a jeho vazby mezi dílčími podsystémy. V závěru a zhodnocení je zmíněno, které systémy mají vysoký dopad na kvalitu hotového výrobku.

Přínosem práce je návrh a testování systému řízení, který již v současném stavu pracuje s vyšší kvalitou než profesionální řešení dostupné na současném trhu. Součástí je také návrh nového stroje, který je schopen testované podsystémy realizovat v souhrnném automatizovaném procesu. Výsledek a kvalita výroby s aplikací nových systémů je srovnána s profesionálními řešeními a dosahuje mnohem lepších výsledků.

Dalším přínosem je popis dopadu výrobních podmínek na výsledný odstín dřevěného povrchu. Na základě rozsáhlého testování byl vytvořen návrh pro řízení karbonizace povrchu, který znatelně zvyšuje počet dosažitelných odstínů pro jakýkoliv laserový zářič.

## 11.3 Doporučení na další výzkum

Během realizace návrhu řídicích systémů a testování byla postupně objevována nová místa, která zaslouží detailnější rozpracování a další výzkum. Některé z těchto míst byly agilně zakomponovány do samotné práce.

Prvním důležitým prvkem je optimalizace CAM softwaru. Tento systém byl oproti současnému stavu obohacen o další podfunkce, které nově realizují systém řízení výrobních podmínek pro využití karbonizace povrchu ke zvýšení výrobní kvality. Procesní skript byl napsán v prostředí MATLAB a pro větší grafiky může doba zpracování přesáhnout i jednu hodinu. Optimalizace a úpravy vedoucí ke snížení výpočetní doby mohou přinést zajímavé poznatky, a především zvýšit praktickou využitelnost navrženého systému.

Další prioritou pro následný výzkum je řízení výrobních podmínek vedoucích k minimalizaci velikosti vygravírovaného pixelu (bodu). Dopad vlhkosti, teploty dřeva a okolního prostředí včetně využití ochranné atmosféry na povrch vypáleného místa a jeho teplotně ovlivněné oblasti, přinese vyšší rozlišení a ostrost výroby. Tyto poznatky pak lze využít i pro zpřesnění kalibračních vzorků. Bude tak možné získat všech 256 odstínů a zároveň zmenšit povrch kalibračního vzorku. Minimalizace kalibračního vzorku vede na rychlejší výrobu a menší odpad. Zároveň maximalizace odstínů kalibračního vzorku zlepši simulaci hotového výrobku. Díky tomu pak dojde k významnému zpřesnění filtračních funkcí, a nakonec ke zlepšení výrobní kvality.

Budoucí výzkum se zaměří také na využití zaostřeného paprsku slunce pro gravírování fotografií do dřeva. Systém předpokládá soustavu zrcadel, která budou sledovacím systémem zaměřena na pohyb slunce po obloze. Získaná energie pak bude soustavou zrcátek a čoček řízena a svedena do výrobního stroje. Zde se naskýtá možnost zásadně snížit provozní náklady nové generace výrobních strojů a drasticky redukovat jejich

negativní dopad na životní prostředí. První testování se bude zabývat rozdíly mezi dopadem laserového a slunečního paprsku na dřevo. Dále se pak naskýtá příležitost srovnat různé metody řízení výkonu zaostřeného slunečního paprsku.

## 12 CONCLUSIONS

This dissertation thesis was focused on the design of CNC laser engraving control systems. The task was to explore usage of laser engraving technology on a wooden surface and to propose opportunities for production quality improvements. Therefore, the introductory part focuses on describing the current state. Recently used types of laser emitters, image filter methods and production procedures for laser engraving of photographs, are described. Bottlenecks and problems faced by the technology in the long run have been defined. On this basis, the design of the control system was proposed and described in detail. This solution provides significant quality improvement for the engraving process of photographs on wood surface. The whole system consists of several subsystems. Its main innovations are not in complexity of individual parts, but in their interconnection, automation possibilities and complexity of a whole system. The cornerstone of the system is the addition of calibration feedback, which is still not utilized for most professional solutions.

Thanks to the expert system of automatic calibration, the feedback allows to set the production parameters to compensate for disturbances. These may be the degradation characteristics of the laser emitter or current properties of the wooden surface. In addition, two series of testing were carried out to detect the appropriate setting of parameters to maximize achievable engraving shades. The first testing contained around one thousand samples, and its contribution was to define parameters that affect the resulting shade of the engraved point. These parameters were tested against each other in a second measurement with 96 samples. The final tested parameters included ambient temperature, humidity, laser focus, power, speed and surface finishing. The aim of the second measurement was to determine the parameter which has the greatest effect on the hue result and will be used for the first design of the calibration system. The key parameter became the laser focus. It is a key production parameter of laser engraving, which can be used to control the carbonization of the surface. Carbonization causes significant changes to the color of engraved wood surface. The algorithm of the control system, which can work properly with this production parameter, was designed.

One of the other objectives was to create a system to simulate the quality of the finished product. This section uses real shades from the feedback calibration pattern and generates the appearance of the finished product based on the input graphic. The quality of the simulation was tested using three samples. The input graphics, simulations and scans of finished products were compared. It turned out that even the first design of the simulation is quite accurate. It can reveal the key details of the future product and reveal which transitions and their shades stand out and which blend in.

Another area that was devoted to this work was the creation of a mathematical model of the engraving machine. All positioning components of the machine have been identified sequentially. Stepper motors have been identified based on information from



the manufacturer, the actual measurement and the available literature. The stiffness of timing belt was identified by two measurements. It was because the first measurement proved inaccurate results. The first measurement is mentioned as an example of an error in measurement design. In the end, the stiffness measurement was performed on a professional tensile testing machine and the damping coefficient was then measured using a laser position measurement. All identified components were then assembled and implemented into the MATLAB/Simulink simulation environment. The model was further tested and compared with real trajectories. Although additional faults were occurring at higher speeds in the real trajectory, the simulation model was able to accurately copy the real trajectory with satisfactory results.

The mathematical model was then used to test the vibration damping algorithm of the stepper motors. Thanks to the knowledge of the actual frequencies and theoretical characteristics of the machine, a series of measurements were carried out which monitored the vibration level during production. The simulation model has been tested to the input shaped signal for vibration damping with great success. The model performed with better damping characteristic and less vibration amplitude. Real measurements showed that vibrations can be damped at lower speeds, but the resulting damping occurs up to the one order later, compared to the frequency of the stepper motor pulses. The resulting damping does not significantly affect the manufacturing process, while the engine coils are turned on.

Other systems that were devoted to this work were filtering of input graphics in the spatial and frequency domains. This included editing the graphic histogram and adjusting the frequency of transitions between the pixels. A significant shift in the production quality of the engraved photographs and the reduction of the production code by up to 30% was achieved.

In chapter 10 the individual results were evaluated and compared to the professional solution currently available on the market. Many designed systems were in development for only a few months, and the proposed system already achieves significantly higher quality when compared to the professional solutions available on today's market. Based on the design of the control systems and final tests, a new laboratory model has been designed to be implemented in the upcoming months. This model removes the latest defects and will be able to fully and automatically exploit the knowledge revealed within this dissertation and increase production quality even more.

## 12.1 Contribution for scientific discipline

The work provides a unique example of creating and validating a mathematical and simulation model of a real CNC machine. Describes the design and implementation of vibration damping by controlling and shaping input signals. This control system has been described and its results have been tested on both simulation and real models. A description of the real impact of this system on the production process is analyzed and evaluated in detail. In the next section, the thesis deals with filtration of input graphics including frequency domain, describes its impact on the quality of engraving results and the size of the production code. The design of automatic calibration of the laser emitter

performance curve brings an unconventional approach to CNC laser engraving control, which can be used on any machine in the world. Basic description of the production conditions of control to use the process of carbonization is described. Wood carbonization process has been tested and confirmed by images from electron microscope.

The work defines several recommendations for further research and points to the current weaknesses that need to be solved in the coming years to further improve the quality of laser engraving of photographs in wood.

## **12.2 Contribution for practice**

A new approach to the control of laser engraving of photographs on wood is proposed in the doctoral thesis. The engraving process is improved by adding the calibration feedback and demonstrates several possibilities of its use. The work defines the overall system and its interconnections among individual sub-subsystems. In the conclusion and evaluation, it is mentioned which systems have a high impact on the quality of the finished product.

The benefit of this work is the design and testing of the control system, which already in the present state works with higher quality than the professional solutions available on the market today. It also includes a design of a new machine that can implement proposed subsystems in an automated process. The results and production quality of new system is compared with professional solutions and achieves much better results.

Another benefit is the description of the impact of the production conditions on the resulting shade of wood surface. Based on extensive testing, a design was created to control the carbonization of the surface, which noticeably increases the number of achievable shades for any laser radiator.

## **12.3 Recommendation for further research**

During the implementation of the design of the control systems and testing, new areas for improvement were gradually discovered, which deserve more detailed elaboration and further research. Some of these areas have been immediately incorporated in the work, but for some of them there has been no time. Those areas for improvement will be realized in the upcoming time after the submission of this thesis.

The first important element is the optimization of CAM software. This system has been upgraded by additional subfunctions, which newly implement control system of production conditions for the utilization of surface carbonization to increase production quality. The process script was written in MATLAB, and for larger graphics the processing time can exceed one hour. Optimization and adjustment leading to reduced computational time can bring interesting insights and, above all, increase the practical usability of the proposed system.

Another priority for subsequent research is the management of production conditions leading to the minimization of the area of the engraved pixel (point). The impact of humidity, wood temperature and surrounding environment, including the use of the

protective atmosphere on the surface of the burned point and its thermally affected area, will improve resolution and sharpness of production. These findings can also be used to refine calibration samples. This will allow all 256 shades to be obtained while reducing the area of the calibration sample. Minimizing the calibration sample leads to faster production and reduction of waste. Conversely maximizing the shades of calibration sample leads to more accurate simulation. This will also improve the precision of filter functions and first of all the production quality.

Future research will also focus on using a focused sun beam for engraving photos into wood surface. There is a possibility to substantially reduce the operating costs of a new generation of production machines and drastically reduce their negative environmental impact. The first testing will address the differences between the impact of laser and solar beam on wood. It Also has the opportunity to compare different methods of controlling the power of the focused solar beam.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. **Kalisky, Y.Y.** *The physics and engineering of solid state lasers*. Bellingham : Wash.: SPIE Press, c2006.
2. **Siegman, A. E.** *Lasers*. California USA : Univ. Science Books Mill Valley, 1986.
3. **PATEL, C. K. N.** Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO&. *PHYSICAL REVIEW*. no. 5. vol. 136 1964, str. p. 8.
4. **Ion, J. C.** *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Amsterdam : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005.
5. **Buus, J., Amann, M. C. a D. J. Blumenthal.** *Tunable laser diodes and related optical sources 2nd ed.* Hoboken : N.J.: John Wiley, c2005.
6. **Epperlein, P. W.** *Semiconductor laser engineering, reliability, and diagnostics: a practical approach to high power and single mode devices, 1st ed.* Chichester, West Sussex, United Kingdom : Wiley, 2013.
7. **O.N.Hung, a další.** Prediction of Laser-treated Knitted Fabric Colour Properties Based on a New Elman Neural Network. *2011 International Conference on Future Computer Sciences and Application*. 2011, stránky 182-186.
8. *Wood Laser Machining using Co2 30W laser in CW and pulse regime.* **Leone, C., a další.** 2009. INNOVATIVE PRODUCTION MACHINES AND SYSTEMS.
9. **Kúdela, Jozef, Kubovský, Ivan a Andrejko, Michal.** Impact of Different Radiation Forms on Beech Wood Discolouration. *Wood Research*. Srpen 2018, stránky 923-934.
10. **Pandey, Krishna K. a Vuorinen, Tapani.** Polymer Degradation and Stability. *Elsevier*. 19. September 2008, stránky 2138-2146.
11. *Ultrasonic stiffness measurements of single plant fibers during humidity cycling.* **MONTONEN, R., a další.** ISBN 978-1-4244-4389-5 : autor neznámý, 2009. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium.
12. *Moisture effects on the ultrasonic velocities in woods.* **Minamisawa, A., a další.** pp. 1105-1108, 1990. IEEE Symposium on Ultrasonics.
13. **Borek, Ondřej.** *Posouzení vlivu podmínek na skladování loupané dýhy na její vlhkost v závodě ALFA Solnice*. Brno : Mendelova univerzita v Brně, 2018.
14. *Laser Wafering.* **Bowden, Stuart a LeBeau, James.** Austin, TX : autor neznámý, 2012. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference (pp. 1826-1829).
15. *Sata Processing for Simulation of Laser Beam Impact - Statistical Method for the Heat-Affected Area Detection.* **Hájková, Jana.** Pilsen, CZ : autor neznámý, 2009. 2009 International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation.
16. **Majer, Dušan.** *Komunikace přes paprsky X*. místo neznámé : Kosmonautix.cz, 2019.
17. **Caristan, C. L.** *Laser cutting guide for manufacturing*. Dearborn : MI: Society of Manufacturing Engineers, 2014.
18. **Claire.** *A Guide to Buy Your First CO2 Laser Engraving and Cutting Machine*. [online] místo neznámé : StyleCNC, 2018.
19. **Baranov, Alexei a Tournié, Eric.** *Semiconductor Lasers*. Oxford : Woodhead Publishing Limited, 2013.
20. *Cramming more components.* **Moore, Gordon E.** volume 38,, 19. Duben 1965, Electronics.
21. **Kapon, Eli.** *Semiconductor Lasers II*. Lausanne : Elsevier Inc. All rights reserved, 1999.
22. **OVERTON, GAIL, a další.** Annual Laser Market Review & Forecast: Where have all the lasers gone? *LaserFocusWorld*. 23. 1 2017.
23. **Unlimited, Strategies.** *THE WORLDWIDE MARKET FOR LASERS: MARKET REVIEW AND FORECAST 2017*. New Hampshire : Strategies Unlimited, 2017.
24. **Allan, Roger.** Lasers in the factory. *IEEE Spectrum*. issue 5. vol. 16 1979.
25. *Lossy coding of ordered dither images -- Comparison of dispersed dither and clustered dither.* **Fumitaka, Ono a Makoto, Kitamura.** Chicago, IL, USA : autor neznámý, 2009. 2009 Picture Coding Symposium.
26. *Recognition of Dithering Patterns for Ordered Dither Technique.* **Chu, Chyi-Hwa.** Chiayi, Taiwan : autor neznámý, 2016. 2016 International Computer Symposium (ICS).

27. *A new progressive coding algorithm of dithered images.* **Pei, Soo-Chang, Guo, Jing-Ming a Lee, Hua.** Lake Tahoe, NV, USA, USA : autor neznámý, 2004. 6th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, 2004.
28. *Image Compression via Dithering for Enhanced Images.* **Mohammad, Fatimah a Munir, A.** Lahore, Pakistan : autor neznámý, 2007. 2007 International Conference on Electrical Engineering.
29. **Yuliasuti, E., Suprijanto a Sasi, S. Retno.** Compact computer vision system for tropical wood species recognition based on pores and concentric curve. *2013 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA).* Srpen 2013, stránky 198-202.
30. **Števek, Juraj, a další.** An automatic identification of wood materials from color images. *2016 Cybernetics & Informatics (K&I).* 24. March 2016.
31. **Filho, P L Paula, a další.** Forest Species Recognition Using Color-Based Features. *2010 20th International Conference on Pattern Recognition.* 7. Říjen 2010, stránky 4178-4181.
32. **Silven, O. a Kauppinen, H.** Color vision based methodology for grading lumber. *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition.* 6. srpen 1994, stránky 787-790.
33. **Cho, T.-H., Connors, R.W. a Araman, P.A.** A computer vision system for analyzing images of rough hardwood lumber. *Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition.* 6. Srpen 1990, stránky 726-728.
34. **Faria, Joao, a další.** A computer vision system for color grading wood boards using Fuzzy Logic. *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics.* 18. Listopad 2008, stránky 1082-1087.
35. **Lee, Sang-Mook, a další.** Automated Grading, Upgrading, and Cuttings Prediction of surfaced dry hardwood lumber. *2009 Proceedings of 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis.* 30. Říjen 2009, stránky 371-376.
36. **Bhandarkar, Suchendra M., a další.** Automated Planning and Optimization of Lumber Production Using Machine Vision and Computed Tomography. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.* 3. Říjen 2008, stránky 677-695.
37. **Liu, Jen-Shuo a Chen, Homer H.** Preserving image color appearance on non-white projection surfaces. *2015 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW).* 30. Červenec 2015.
38. **Guo, Minghui a Guan, Xin.** A Note on the Influence of Pretreatment on the Photodiscoloration by UV Light as a Function of Energy of Wood. *2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.* 23. Červenec 2010.
39. **Reprap.org.** *GNU Free Documentation License 1.2.* online : Reprap.org, 2017.
40. **Mike, Lnych.** When Programmers Should Know G Code. *Modern Machine Shop.* 18. 1 2010.
41. **Mese, M. a Vaidyanathan, P.P.** Recent advances in digital halftoning and inverse halftoning methods. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications .* 7. Srpen 2002 , stránky 790-805.
42. **Chau, W.K., Wong, S.K.M. a Wan, S.J.** A critical analysis of dithering algorithms for image processing. *IEEE TENCON'90: 1990 IEEE Region 10 Conference on Computer and Communication Systems. Conference Proceedings.* Zář 1990, stránky 309-313.
43. **LABS, TOPAZ.** Gigapixel, AI. *Topaz Gigapixel AI.* [Online] <https://topazlabs.com/gigapixel-ai/>.
44. **Kenjo, Takashi a Sugawara, Akira.** *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls.* místo neznámé : Clarendon Press, 1994.
45. **Lipo, T. A.** *Introduction to AC machine design 3rd edition.* Wisconsin : Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 2011.
46. **McAndrew, Alasdair.** *Introduction to digital image processing with MATLAB.* Boston : Thomson Course Technology, 2004.

## VLASTNÍ PUBLIKACE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

JUREK, M. & ŠKUTA, J. Open-Source Smart Home Modules. In Proceedings of 17th International Carpathian Control Conference ICCC'2016. Tatranská Lomnica, Slovak Republic, May 29 – June 1, 2016, pp. 286-290. ISBN: 978-1-4673-8606-7

JUREK M. Input Shaping for Underdamped Systems. XLII. Seminar ASR '2017 "Instruments and Control" © 2017, VŠB-TUO, Ostrava, ISBN 978-80-248-4040-6

JUREK M. & WAGNEROVÁ, R. Matlab as CAM software. In Proceedings of 19th International Carpathian Control Conference ICCC'2018. Szilvásvárad, Hungary, May 28-31, 2018, pp. 484-487. ISBN: 978-1-5386-4761-5

JUREK, Martin. Mathematical models of 2D plotter components. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní. 2018, 64(2), 9-15. DOI: 10.22223/tr.2018-2/2045. ISSN 1210-0471.

JUREK, Martin. Input Shaping for Underdamped Systems. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní [online]. 2017, 63(1), 39-47 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.22223/tr.2017-1/2026. ISSN 1210-0471. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/133279>

JUREK M. & WAGNEROVÁ, R. Mathematical Model of Real CNC Machine. In Proceedings of 20th International Carpathian Control Conference ICCC'2019. Kraków-Wieliczka, Poland, May 26-29, 2019

JUREK M. & WAGNEROVÁ, R. Frequency filtering of source images for laser engravers. In Proceedings of 20th International Carpathian Control Conference ICCC'2019. Kraków-Wieliczka, Poland, May 26-29, 2019

## Životopis

### Osobní informace

Jméno                      Ing. Martin Jurek  
E-mail                     martin.jurek@vsb.cz  
Narození:                31.10.1990, Ostrava



### Vzdělání

2015 – Současnost    VŠB-TUO, FS, Ph.D. studium,  
Řízení strojů a procesů.  
2016                     Studijní stáž, Shenyang, China  
2015                     Ocenění za DP, STOČ Zlín 2. místo; ČKAIT Ostrava award  
2013-2015            VŠB-TUO, FS, Ing. studium, Automatické řízení a inženýrská  
informatika  
2012                     GE Foundation Scholar-Leaders award  
2011                     Erasmus, Tampere, Finland  
2010-2013            VŠB-TUO, FS, Bc. studium, Aplikovaná informatika a řízení

### Pracovní zkušenosti

2018 - Současnost    MSIC s.r.o., Specialista automatizace a robotizace  
2016 - Současnost    Založení a provoz sdíleného vývojového centra IdeaHUB z.s.  
2016 – Současnost    OSVČ výroba dárkových a reklamních předmětů, 3D tisk a  
laserové gravírování  
2013–2018            Založení a organizace aktivit Patrioti MSK, z.s.  
2012–2013            Studentská organizace AIESEC Ostrava

### Jazyková vybavenost

Angličtina B2 aktivní

V Ostravě 27.4.2019

## Curriculum Vitae

### Personal information

Name	Ing. Martin Jurek
E-mail	<a href="mailto:martin.jurek@vsb.cz">martin.jurek@vsb.cz</a>
Birth:	31.10.1990, Ostrava



### Education

2015 – present	VŠB-TUO, FS, Ph.D. study, Control of Machines and Processes.
2016	Study internship, Shenyang, China
2015	Master thesis awards, STOČ Zlín 2. place; ČKAIT Ostrava award
2013-2015	VŠB-TUO, FS, Ing. study, Automatic Control and Engineering Informatics
2012	GE Foundation Scholar-Leaders award
2011	Erasmus, Tampere, Finland
2010-2013	VŠB-TUO, FS, Bc. study, Applied Informatics and Control

### Work experience

2018 - present	MSIC s.r.o., Automation and robotics specialist
2016 - present	Foundation and administration of development centre IdeaHUB z.s.
2016 – present	Self-employed, production of gifts and merchandising, 3D print and laser engraving
2013–2018	Foundation and organization of activities of Patrioti MSK, z.s.
2012–2013	Student organization AIESEC Ostrava

### Language skills

English B2 active

In Ostrava 27.4.2019